

وزارة التعليم و البحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT **Génie Mécanique** <sup>lex</sup>

## PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE DU PROCÉDE DE  
TRAITEMENT THERMIQUE  
SUPERFICIEL DE L'ACIER  
PAR COURANT A HAUTE  
FREQUENCE

1 PLANCHE

Proposé par :

Etudié par :

Dirigé par :

M<sup>r</sup> Pavlov

M<sup>r</sup> Boudjedir

M<sup>r</sup> Pavlov

## Remerciements

Je tiens à exprimer mes remerciements à mon promoteur M<sup>r</sup> PAVLOV qui n'a ménagé aucun effort pour le suivi de ce travail.

Ma reconnaissance envers tous les enseignants ayant contribué à ma formation d'ingénieur, en particulier ceux de l'ENP.

Que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce projet trouvent ici ma profonde gratitude.

Boudjedir Mokhtar

## Dédicaces.

Je dédie ce modeste travail à :

- mes parents
- ma grand-mère maternelle
- mes frères et sœurs
- tous ceux qui témoignent qu'il n'existe  
de dieu qu'Allah et que Mohammed est  
son envoyé et son prophète.

Ministère de l'enseignement supérieur

وزارة التعليم العالي

Ecole nationale polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département : Génie mécanique

فرع : الهندسة الميكانيكية

Promoteur : Pavlov

الموجه : بافلوف

Elève ingénieur: Boudjedir Mokhtar

الطالب المهندس: بوجدير مختار

الموضوع: دراسة طريقة المعالجة الحرارية السطحية للصلب عن طريق التيار العالي التردد.

الملخص: يتمثل هذا المشروع في دراسة تأثير التصليد السطحي للصلب عن طريق التيار

العالي التردد على بنية هذا الصلب وخصائصه بإضافة إلى عمق التصليد. ونقدم

مع هذه الدراسة آلة للتصليد عن طريق التعريض ومنظومة من أجل دوران القطع.

Sujet: Etude du procédé de traitement thermique superficiel de l'acier par courant à haute fréquence.

Résumé: Ce projet consiste en une étude de l'influence du régime de la trempe superficielle de l'acier par courant à haute fréquence, sur la structure, les propriétés et les profondeurs des couches trempées. on y présente également une machine de trempe par induction et un mécanisme de rotation des pièces.

Subject: A process study of thermal superficial treatment of the steel by high-frequency current.

Abstract: A study of the influence of conditions of the superficial quenching by high-frequency current on structure, properties and depth of quenching layer is the main purpose of this work. A quenching machine and a mechanism rotating the treated details is also presented.

## NOTATION UTILISEE

HF : haute Fréquence

$\theta$  : Température

$\tau$  : Temps

P : Puissance de chauffage

v : vitesse de déplacement des Pièces

$M_s$  : Température de début de transformation

$M_f$  : " " fin " "

$\delta$  : Profondeur de pénétration de trempe

HRC : Dureté Rockwelle "C"

HV : " Vickers

HB : " Brinell

# Table des Matières .

	Page
I. Introduction .....	1
I <sub>1</sub> . Généralités .....	1
I <sub>2</sub> . Présentation du sujet .....	1
I <sub>3</sub> - Mécanisme de la trempe .....	2
II. Etude de la trempe par courant .....	9
de haute fréquence .....	
II <sub>1</sub> . Introduction .....	9
II <sub>2</sub> . Principe du chauffage par courant H.F. ....	10
II <sub>3</sub> . Loi de répartition des courants H.F. ....	12
II <sub>4</sub> . Les Inducteurs .....	13
II <sub>5</sub> . Mode d'exécution de la trempe H.F. ....	14
III. Méthodes expérimentales .....	16
III <sub>1</sub> . Nuance et forme des pièces étudiées ....	16
III <sub>2</sub> . conditions de travail des Pièces et .....	17
exigences techniques .....	
III <sub>3</sub> - Techniques expérimentales .....	17
III <sub>4</sub> . Micrographie .....	20
IV . Expériences, Résultats et Interprétations ....	22
IV <sub>1</sub> . Expériences .....	22
IV <sub>2</sub> . Résultats et Interprétations .....	22

IV <sub>3</sub>	Evolution de la dureté suivant .....	24
	la section des Pièces trempées .....	28
IV <sub>4</sub>	Influence de la Puissance sur la dureté .....	28
	et sur la Pénétration de trempe .....	
IV <sub>5</sub>	Influence de la vitesse d'avance des Pièces .....	31
	Sur la dureté et la pénétration de trempe .....	
IV <sub>6</sub>	Recommandations .....	34
IV <sub>7</sub>	Microstructures .....	35
V	Présentation de la machine de trempe .....	39
V <sub>1</sub>	Schéma Principal de la machine .....	39
V <sub>2</sub>	Caractéristiques techniques .....	41
V <sub>3</sub>	Principe de fonctionnement .....	42
V <sub>31</sub>	Dispositif d'approvisionnement des Pièces .....	42
V <sub>32</sub>	Mécanisme d'avance des Pièces .....	43
V <sub>33</sub>	Mécanisme de rotation des rouleaux .....	43
	Supports de Pièces .....	
VI	Calcul du moto-réducteur de rotation des .....	45
	rouleaux Supports de Pièces .....	
VI <sub>1</sub>	Caractéristiques du moto-réducteur .....	45
VI <sub>2</sub>	Calcul cinématique des engrenages .....	45
VI <sub>3</sub>	calcul dynamique des engrenages .....	49
VI <sub>4</sub>	Calcul d'arbres .....	51

VI 5.	Vérification des arbres.....	57
VI 6.	Calcul de roulements.....	61
VII	Conclusion.....	65



# Tables des Figures

Figure	Pages
Diagramme des lignes de transformations .....	3
Shéma du mécanisme de trempe .....	3
Influence de la teneur en carbone sur les points.....	4
$M_s$ et $M_f$ .....	
Influence de la teneur en carbone sur la dureté....	5
Diagramme indiquant les températures de trempe ....	5
Diagramme thermo-cinétiques (temps-temperature-vitesse)....	6
Courbes Jominy.....	8
Shéma du dispositif du chauffage par courant H.F. ....	10
comparaison des pertes par hystérésis et courant .....	
de Foucault .....	11
Certains types d'inducteurs .....	13
Inducteur cylindrique monospire .....	14
Axe de ressorts .....	17
Evolution de la dureté suivant la section .....	25-26
des Pièces trempées .....	
shéma général du changement de la dureté suivant ...	27
la section des pièces trempées .....	
Evolution de la dureté de la couche superficielle .....	

en fonction de la Puissance de chauffage .....	
Evolution de la Pénétration de trempe en fonction....	30
de la Puissance de chauffage.....	
Evolution de la dureté de la couche Superficielle en fonction de la vitesse d'avance .....	32
Evolution de la Profondeur de pénétration de trempe...	33
en fonction de la vitesse d'avance	
changement de la structure suivant la section.....	35
d'une Pièce trempée .....	
Influence de la Puissance sur la structure .....	36
des Pièces trempées .....	
Influence de la vitesse sur la structure .....	37
des pièces trempées .....	
Shéma Principal de la machine de trempe .....	40

# I INTRODUCTION

1

## I<sub>1</sub> - Généralités :

des traitements thermiques sont destinés à améliorer et à modifier les propriétés des métaux et alliages et ont suivi sur le plan industriel les progrès des connaissances métallurgiques. C'est à partir de la fin du siècle dernier que les traitements des Aciers de construction, puis des Aciers spéciaux ont pris naissance. Encore, il a fallu l'essor de l'automobile, de l'aviation et de l'armement pour conférer à cette évolution toute son ampleur.

des traitements thermiques s'adaptent aux nécessités nouvelles et se modifient en complétant parfois l'action des traitements mécaniques, ce qui permet d'atteindre sur certains alliages des caractéristiques exceptionnelles. Certaines pièces mécaniques exigent pour leur emploi une dureté élevée, une meilleure résistance à l'usure et une bonne tenue à la fatigue des couches superficielles tandis que le cœur de ces pièces doit rester ductile pour bien résister aux charges dynamiques.

Pour obtenir ces résultats, on fait subir à ces pièces l'un des traitements thermiques suivants :

1) traitement thermo-chimique (cimentation, Nitruration)

2) traitement thermique superficiel par :

2a) chalumeau à gaz

2b) courant à haute fréquence.

## I2. Présentation du Sujet.

Le sujet qui a été proposé pour l'élaboration de ce projet de fin d'études consiste à faire une étude sur le procédé de trempe superficielle de l'Acier par courant à haute fréquence en examinant les propriétés et les profondeurs des couches trempées en fonction du régime de trempe, avec présentation d'une machine de trempe par induction.

## I3. Mécanisme de la trempe.

### I31. Cycle thermique :

Le cycle thermique comprend trois phases successives :

- 1) chauffage à une température  $\theta_c$  correspondant à un état austénitique ( $\theta_c > A_3$ ).
- 2) Maintien à cette température  $\theta_c$  jusqu'à l'achèvement des transformations de phases.
- 3) Refroidissement à une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe.

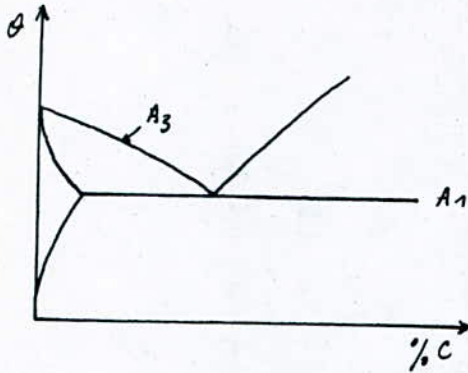


fig I1: Diagramme montrant les lignes de transformation.

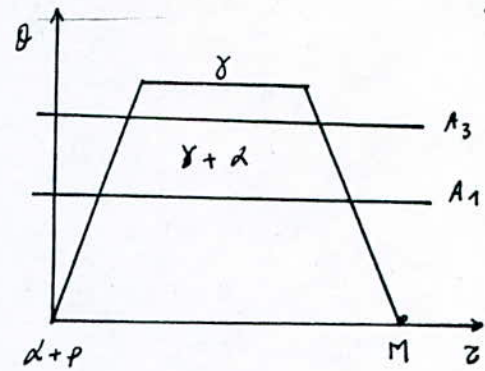


fig I2: Schéma du mécanisme de trempe

### I 32. Transformations de l'austénite.

La décomposition de l'austénite peut se faire par trois transformations distinctes :

- Transformation Perlitique ( $A_{r'}$ ) : des températures de ce domaine sont élevées, mais inférieures à  $A_1$ . Le phénomène de diffusion très important permet la séparation nette des deux phases ferrite - cémentite.
- Transformation Martensitique ( $A_{r''}$ ) : C'est une transformation sans diffusion du carbone. Du point de vue cinétique, cette transformation apparaît dès une température inférieure à la température " $M_s$ ". On obtient une martensite qui a la même teneur en carbone que l'austénite. Cependant, la transformation de l'austénite n'est pas totale si on n'a pas atteint la température " $M_f$ ". L'austénite à côté de la martensite est appelée austénite résiduelle ( $\%C > 0,6$ )

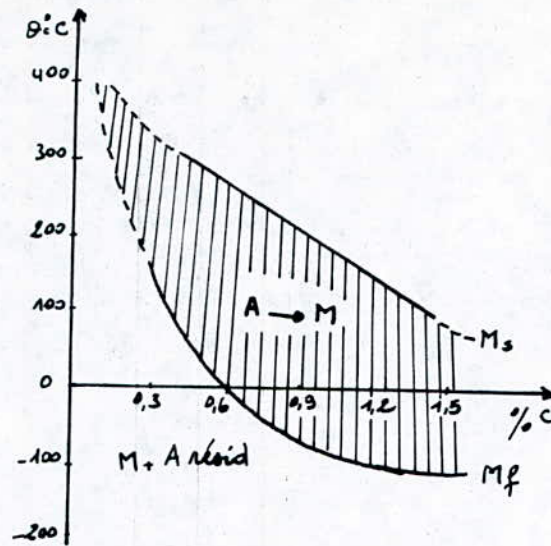


fig. I 3. - Influence de la teneur en carbone sur les points  $M_s$  et  $M_f$  [ 1 ]

- Transformation bainitique ( $A_r''$ ) : Celle prend place aux températures intermédiaires et met en jeu des phénomènes de diffusion à distance courte. En effet, la ferrite se forme par cisaillement du réseau de la martensite vu que la mobilité des atomes est insuffisante pour permettre la diffusion. Les atomes de carbone beaucoup plus petits peuvent encore se rassembler par diffusion dans le réseau austénitique et provoquent la formation de carbures.

I 33. Facteurs de trempe :

Les facteurs liés aux transformations subies par l'Acier sont :

a) La composition de l'Acier : la figure (I 4) montre que plus la teneur en carbone est élevée plus la dureté est importante.

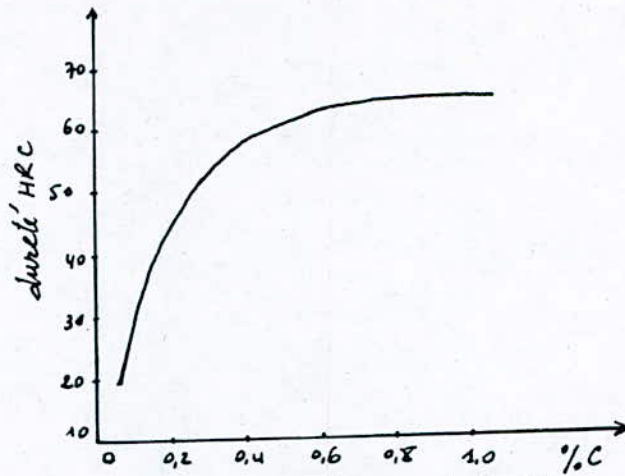


fig. I4 : Influence de la teneur en carbone sur la dureté. [1]

b) La température de chauffage : Elle dépend de la teneur en carbone et doit être suffisante pour transformer le fer  $\delta$  en fer  $\gamma$ .

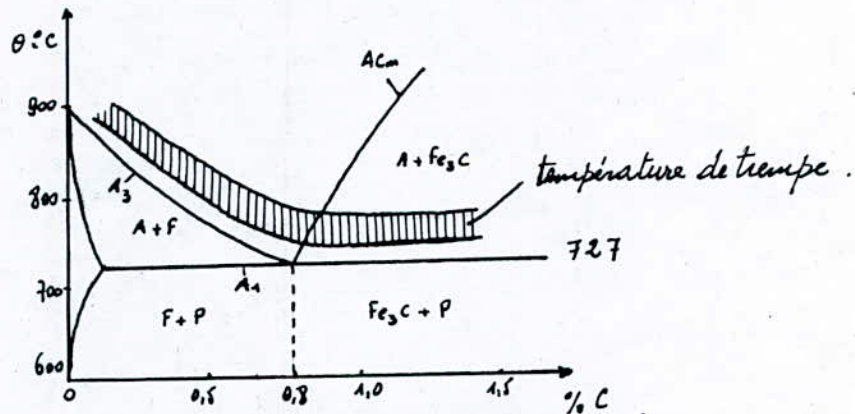


fig. I5 : Diagramme indiquant les températures de trempe. [1]

En pratique, les aciers hypoeutectoïdes sont trempés à  $A_3 + 50^\circ\text{C}$ , tandis que les aciers hypereutectoïdes sont trempés sensiblement tous à la même température  $A_1 + 50^\circ\text{C}$ .

c) Durée de chauffage : de maintien à la température nécessaire doit assurer l'achèvement des transformations de phases, sans provoquer le grossissement du grain et la décarburation des couches superficielles de l'acier.

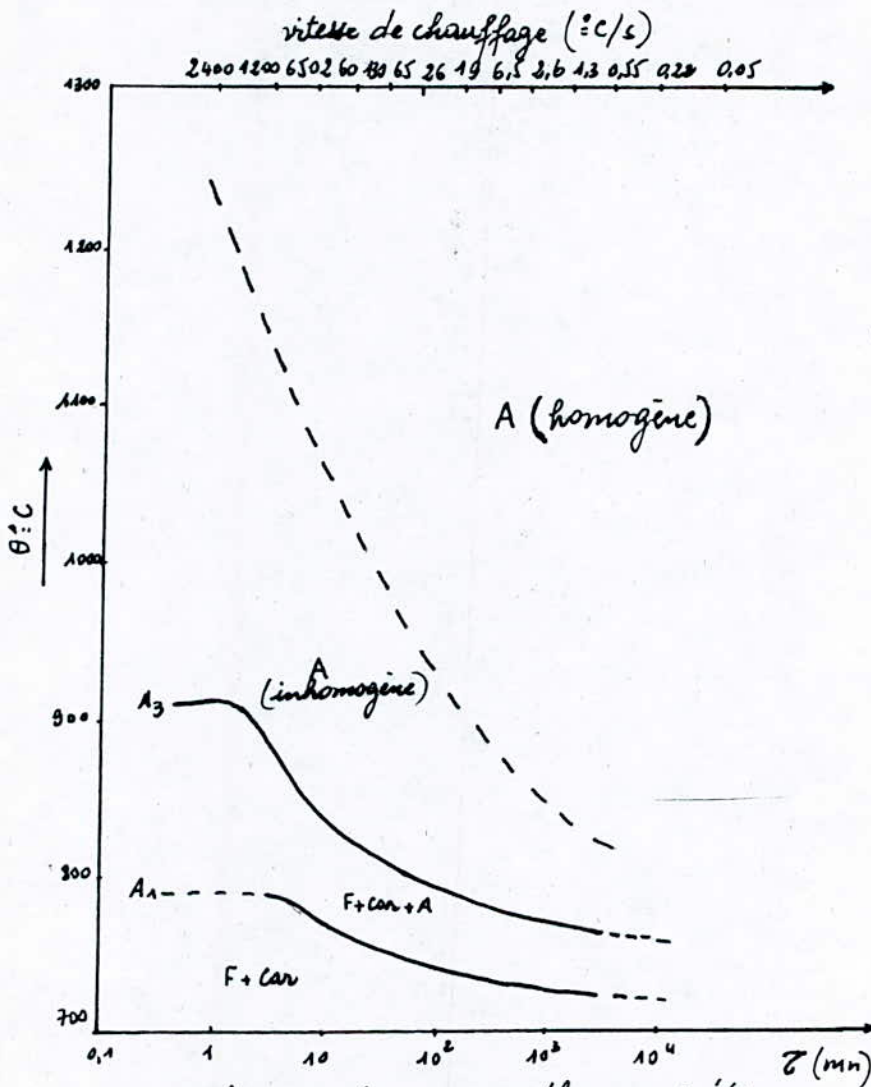


fig. I<sub>6</sub> : Diagramme thermo. cinétiques

(temps, température, vitesse de chauffage) [1]



d) Refroidissement : Pendant la trempe, le refroidissement doit assurer dans la section donnée de la pièce l'obtention de la pénétration définie sans produire de défauts tels que tapures, déformations et contraintes de traction résiduelles élevées dans les couches superficielles. On utilise pour les bains de trempe des liquides qui peuvent bouillir tels que : eau, solutions aqueuses de sels et d'alcalins, huiles...

### I 34. Trempabilité et Pénétration de trempe

La trempabilité d'un acier et son aptitude à former de la martensite par refroidissement convenable après chauffage dans le domaine austénitique.

La détermination préalable de la trempabilité est indispensable, car la pénétration de trempe pour deux aciers dont l'analyse chimique a donné les mêmes résultats peut être différente, suivant leur provenance et même suivant la coulée.

On détermine la trempabilité d'un acier par l'essai Jominy qui consiste à projeter un jet d'eau froide sur l'extrémité inférieure d'une éprouvette cylindrique (longueur 100 mm,  $\phi$  25 mm), portée à la température de trempe (fixée par les normes ou les cahiers des charges) pendant 30 mn et maintenue

verticalement, puis à mesurer la dureté Rockwell "C" sur un méplat parallèle aux génératrices. La courbe Jominy représente la dureté en fonction de la distance entre le point considéré et l'extrémité refroidie. La trempabilité est d'autant plus grande que la courbe descend moins rapidement.

Les éléments d'addition (Ni, Cr, Mo, etc...) favorisent la pénétration de tremp.

La figure (I7) représente les courbes Jominy pour les deux aciers suivant :

- ① Acier non allié : % C  $\geq$  0,32
- ② Acier de type : 40NCD17.

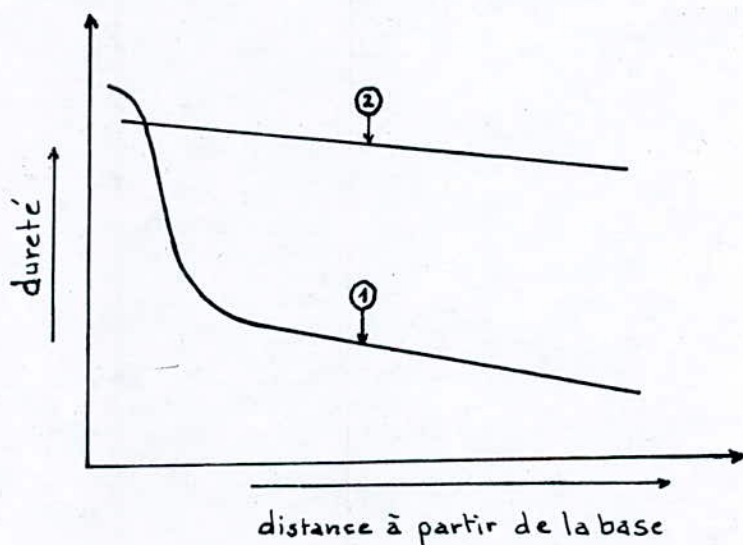


fig. I7: courbes Jominy. [2]

## II ETUDE DE LA TREMPE PAR COURANT A HAUTE FREQUENCE

### II 1. Introduction.

Une des possibilités majeures de l'induction réside dans la possibilité de pouvoir effectuer un chauffage superficiel et localisé des pièces. De nombreuses pièces mécaniques travaillant dans un régime de charges dynamiques doivent résister en même temps à l'usure et conserver les propriétés résilientes (Ex: Axes, arbres, certains pignons, etc...). Le traitement par courant à haute fréquence répond parfaitement à ces critères en concentrant une puissance par unité de surface très importante, ce qui permet un échauffement rapide de la zone à tremper, d'où augmenter ainsi la productivité.

Le tableau (II<sub>1</sub>) montre clairement l'importance de ce procédé par rapport aux autres modes de chauffage connus.

Mode de chauffage	Puissance / cm <sup>2</sup>
Convection	0,5 Watt
Radiation	25 "
chalumeau	800 "
Induction	10.000 "

Tableau II<sub>1</sub>: Différents modes de chauffage.

## II 2. Principe du chauffage par courant H.F

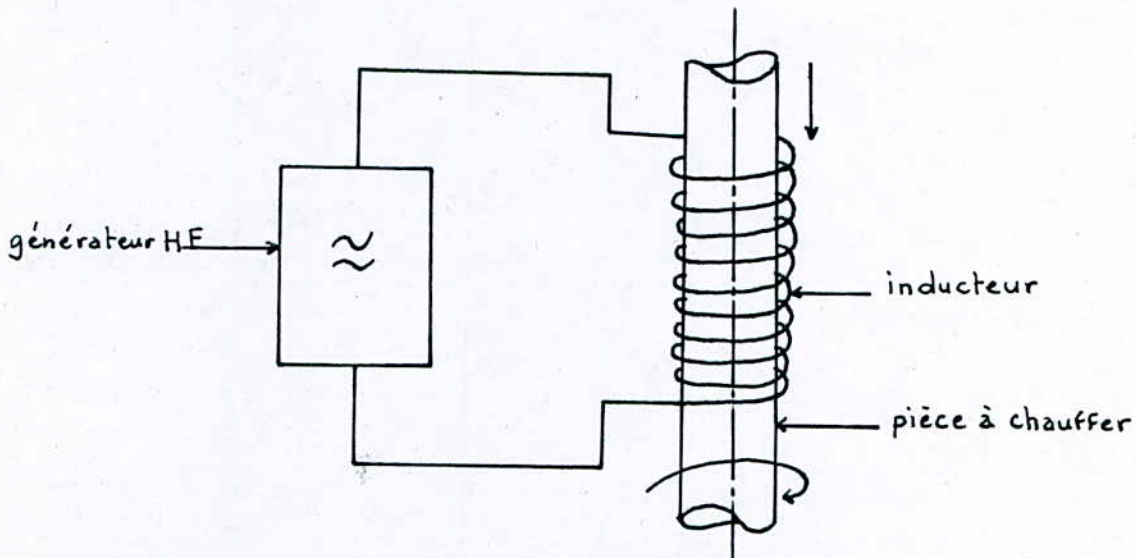


fig. II 8 - Schéma du dispositif de chauffage par courant H.F.

la pièce ou la zone de celle-ci que l'on désire chauffer superficiellement est placée à l'intérieur d'un inducteur composé d'une ou de plusieurs spires en cuivre refroidies par l'eau, dans lequel circule un courant alternatif. Le champ magnétique pulsé, créé par celui-ci, induit un potentiel électrique dans la pièce; et comme celle-ci est en circuit fermé, un courant de même fréquence que le courant inducteur peut y circuler (courant de Foucault). La pièce s'échauffe par hystérésis magnétique et effet Joule. Si le matériau à chauffer est magnétique, il est soumis à une alimentation alternative dont l'inertie magnétique entraîne une dépense d'énergie connue sous le nom de pertes par hystérésis. Ces derniers s'ajoutent aux pertes par courants de Foucault pour

l'échauffement de la pièce.

Des pertes par hystérésis cessent dès que le matériau n'est plus magnétique, c'est à dire au passage du point de curie ( $768^{\circ}\text{C}$ ), seules les pertes par courant de Foucault demeurent pour continuer l'échauffement de la pièce.

des deux sources de chaleur n'ont pas la même importance à basse et à haute fréquence comme le montre la fig (II 8)

Les pertes par hystérésis sont prépondérantes à basses et moyennes fréquences; alors qu'aux hautes fréquences, ce sont les pertes par courant de Foucault qui sont les plus importantes.

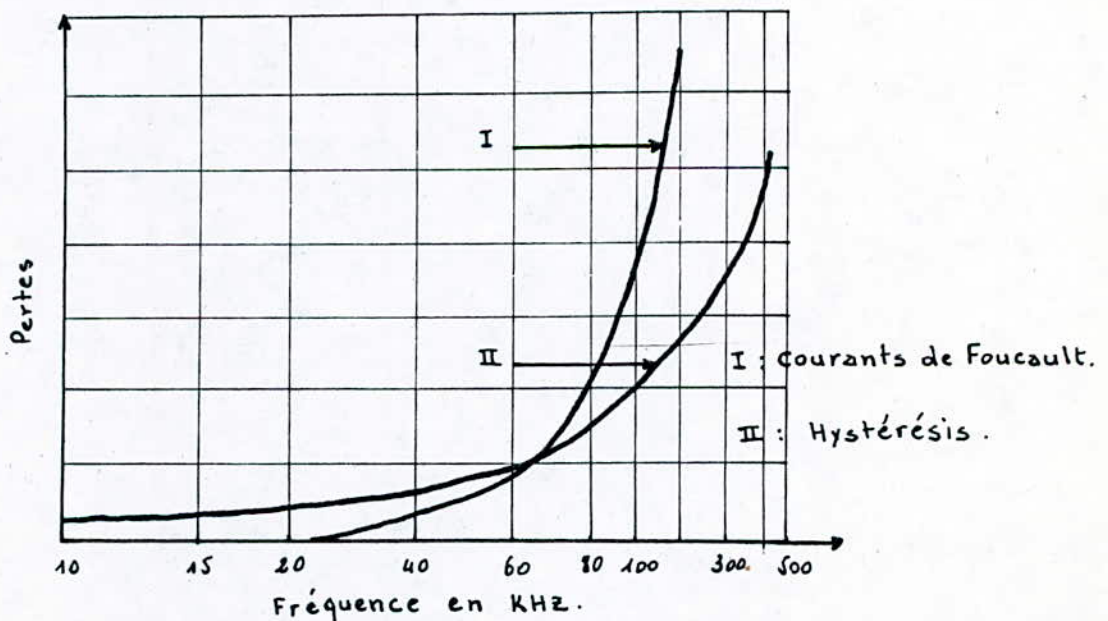


fig-IIg : Pertes Par Hystérésis et courants de Foucault. [3]

### II3. Loi de répartition des courant HF dans le matériau

En supposant que le champ extérieur de la pièce est sinusoïdal et de pulsation  $\omega$  constante, l'épaisseur " $\epsilon$ " dans laquelle circule le courant, pour une pièce cylindrique très longue et de grand diamètre par rapport à  $\epsilon$ , est donnée par la formule suivante :

$$(1) \quad \epsilon = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}}$$

$\rho$  : résistivité [ $\Omega \cdot m$ ]

$\mu$  : perméabilité magnétique [ $H/m$ ]

En remplaçant  $\omega$  par  $2\pi f$  ;  $f$  [ $Hz$ ], la relation (1) devient :

$$(2) \quad \epsilon = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu f}}$$

Cette expression peut s'écrire finalement sous la forme :

$$(2') \quad \epsilon = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

avec  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [ $H/m$ ]

Dans cette expression  $\mu_r$  est la perméabilité relative.

On voit, à partir des expressions (2) et (2') que l'épaisseur est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence.

Si la résistivité est exprimée en  $\Omega \cdot m$ , l'épaisseur est alors donnée en [ $mm$ ]

## II 4. Les inducteurs

la forme de l'inducteur s'adapte généralement à la forme de la pièce ou de la zone de celle-ci que l'on désire tremper superficiellement.

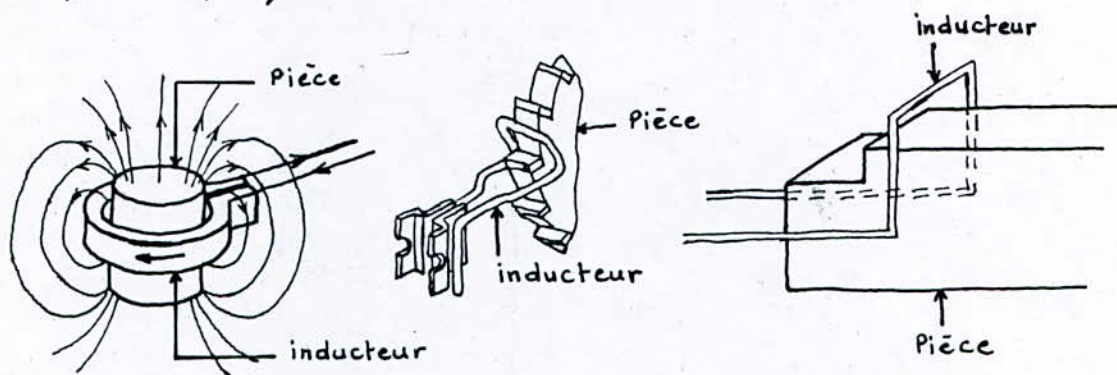


fig. II 10. Certains types d'inducteurs.

Il n'existe pas en pratique une formule permettant de déterminer un inducteur, mais d'après l'expérience acquise par l'observation des résultats obtenus, la règle élémentaire applicable pour un inducteur, monospire de forme cylindrique, afin d'obtenir une répartition correcte du chauffage est : la hauteur d'un inducteur est toujours égale ou inférieure à son rayon.

$$H \leq \frac{D}{2}$$

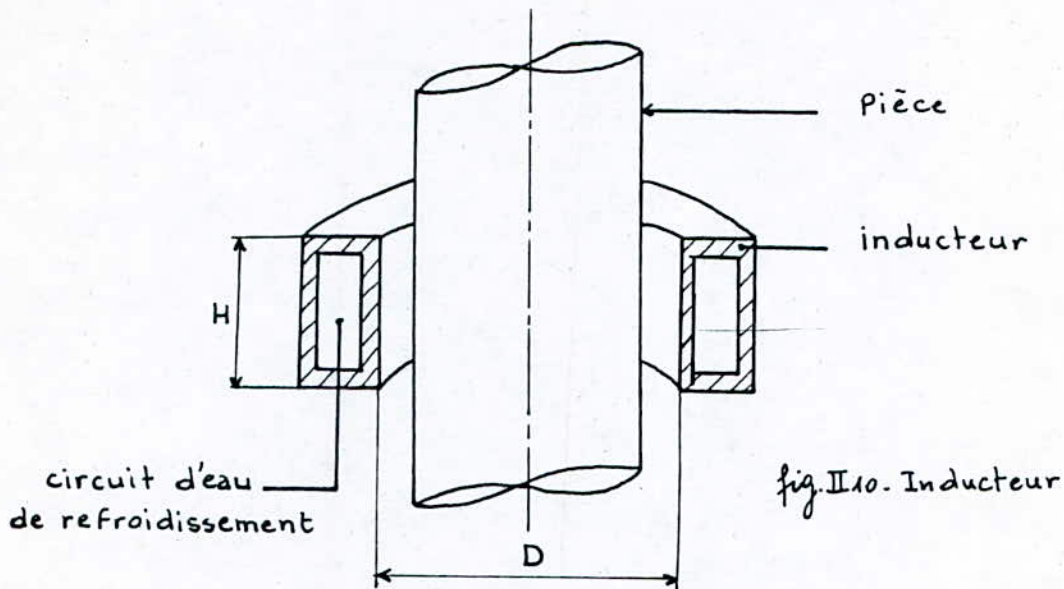


fig. II.11. Inducteur cylindrique monospire.

## II 5. Mode d'exécution de la trempe H.F.

A la SONACOME SNVI. CVI, on dispose de deux machines de trempe accouplées au générateur de chauffage par induction à haute fréquence. L'une est à défilé vertical pour les pièces de formes particulières, l'autre est à défilé horizontal adaptée pour les pièces cylindriques. Nous avons travaillé sur la machine à défilé horizontal qui se présente sous la forme d'un ensemble autonome comprenant :

- de transformateur d'impédance à couplage fixe.
- de système électro-pneumatique d'approvisionnement automatique des rouleaux de transport et de rotation des pièces.



- de dispositif de défilement (avance) des pièces.
- Une lyre programme pour les réglages nécessaires.
- Une armoire électrique comprenant tous les appareils d'automatisme et de contrôle.
- Un dispositif d'arrosage (trempe).

Le cycle de traitement se déroule de façon entièrement automatique, mais l'approvisionnement des pièces s'effectue manuellement sur un plan incliné de chargement.

## III METHODES EXPERIMENTALES

### III 1. Nuance et forme des pièces étudiées

#### III 1.1. Nuance:

Les essais ont été réalisés sur des pièces en acier de type XC48, de structure initiale ferrito-perlitique et dont la composition chimique (en %) est :

$C = 0,45 - 0,5$  ;  $Mn = 0,55 - 0,80$  ;  $Si < 0,4$

$P < 0,04$  ;  $S = 0,02 - 0,35$  ;  $Cr < 0,1$

la dureté initiale évaluée par l'essai Brinell est :

$\Phi 42 \Rightarrow HB = 208$

#### III 1.2. Forme

Les pièces sont des axes de ressort et avant d'être trempées, elles subissent les opérations suivantes :

- Francouage à longueur .
- Tour, chanfrein des 2 côtés
- Percage, taraudage .
- Fraisage du cran
- " du plat
- Percage du trou
- Rectification ébauche avant la trempe H. F.
- lavage .
- Contrôle avant traitement thermique .

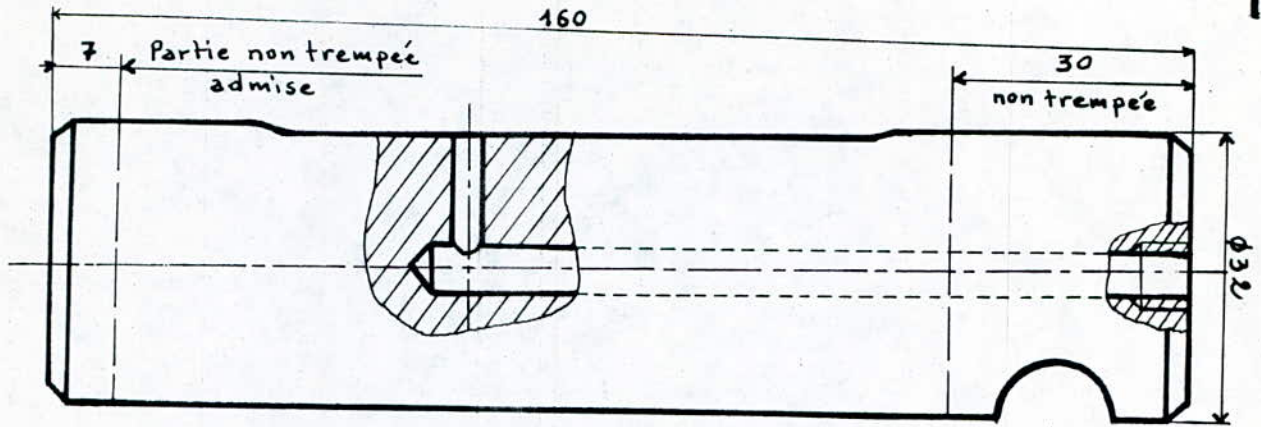


fig. III 12. Axe de ressorts.

Ce type de pièces se monte dans les jumelles des ressorts à lames et servent à fixer le ressort avec le châssis du camion.

### III 2. Conditions de travail des pièces et exigences techniques.

Les pièces (Axe de Ressorts) doivent donc résister non seulement à l'usure, mais aussi aux charges dynamiques et aux chocs.

Par conséquent les cahiers des charges exigent pour ces pièces :

- Profondeur durcie par trempe superficielle :

$$1,5 - 2,0 \text{ [mm]}$$

- Dureté Rockwell sur zone trempée :

$$\text{HRC} \geq 57.$$

- Absence de décarburation sur partie traitée.

### III 3. Techniques expérimentales.

#### III 3 1. Essais de dureté.

La dureté peut être définie par la résistance qu'oppose un matériau à sa pénétration par un autre corps plus dur que lui.

### III 311. Essai de dureté Brinell.

Cet essai consiste à imprimer dans la pièce une bille en acier de diamètre "D" sous une charge "F", et à mesurer le diamètre "d" de l'empreinte après suppression de la charge "F".

Le nombre de Brinell est défini par le quotient de la charge "F" exprimée en [daN] par l'aire en [mm<sup>2</sup>] de l'empreinte considérée comme une calotte sphérique.

$$HB = \frac{F}{S} \quad \text{ou} \quad HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Des tables donnent directement la valeur HB en fonction du diamètre de l'empreinte.

On a effectué l'essai Brinell suivant la norme NFA03-152 c'est à dire :

- Une bille de diamètre  $D = 10 \text{ mm}$
- Une charge de 3000 kgf.
- Une durée d'application de la charge : 10 s.

### III 312. Essai de dureté Vickers

L'essai Vickers consiste à imprimer dans la pièce un pénétrateur en diamant en forme de pyramide droite à base carrée sous une charge "F", et à mesurer la

diagonale "d" de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.

Le nombre de Vickers s'obtient par le quotient de la charge "F" en [dan] par la surface S [mm<sup>2</sup>].

$$HV = \frac{F}{S} \quad \text{ou} \quad HV = \frac{1,854 F}{d^2}$$

Des tables donnent directement le nombre HV en fonction de la valeur de la diagonale "d".

La charge utilisée durant nos essais est de 300g, ceci pour réduire au plus l'erreur de lecture.

Le tableau suivant donne les correspondances entre les duretés.

$\phi$ de l'empreinte en [mm]	HB	HV	HRC	$\phi$ de l'empreinte en [mm]	HB	HV	HRC
41,9	208	223	16	25,6	573	647	56
39,7	232	248	21	25,3	587	671	57
⋮	⋮	⋮	⋮	25,1	597	688	58
27,2	507	548	51	24,9	606	707	59
26,5	534	587	53	24,7	616	727	60
26,2	547	606	54	24,5	627	740	61
25,9	560	626	55	24,3	637	765	62

Tableau III<sub>2</sub>: correspondance entre duretés Brinell - Rockwell - Vickers.

### III 4. Micrographie.

La métallographie microscopique a pour but de mettre en évidence les constituants des produits métallurgiques.

Pour cela on procède à l'examen au microscope d'une surface polie et généralement attaquée.

#### III 41. Préparation des échantillons.

Les pièces trempées à la H.F ont été tronçonnées à l'aide d'une scie mécanique avec lubrification pour ne pas provoquer une grande élévation de température et par conséquent éviter une modification de la constitution du métal.

#### III 42. Polissage.

Le polissage consiste à rendre la surface de l'échantillon plane et brillante de façon à ce qu'elle ne présente aucune rayure susceptible de gêner l'examen ultérieur.

Cette opération se réalise en frottant le métal sur des disques abrasifs de plus en plus fins respectivement :

80, 180, 600, 1000 [grains/mm<sup>2</sup>]. On ne doit passer à un disque à grains plus fins qu'après avoir lavé l'échantillon sous l'eau de façon à éviter d'entraîner les grains d'abrasifs sur l'autre disque et croiser le sens du polissage qu'entre chaque disque. On a utilisé au polissage de finition

de la pâte diamantée formée de grains très fins enrobés dans un liant chimique soluble dans l'eau, ce qui rend son enlèvement aisé au nettoyage. Après obtention d'un état de surface "miroir", l'échantillon est nettoyé à l'eau et séché à l'air comprimé filtré.

### III 43. Attaque chimique.

d'attaque a pour but de révéler les joints de grains et de différencier les constituants de l'acier trempé. Elle a lieu à la température ambiante et dure quelques secondes.

( $\approx 30$  s). La méthode consiste à tremper la face à attaquer dans le Nital à 5%. [5% d'acide nitrique et 95% d'alcool éthylique]. d'arrêt de l'attaque se fait en lavant l'échantillon dans un courant d'eau puis on sèche dans un jet d'air sous pression.

d'examen microscopique et la prise de photographies ont été réalisés à l'aide d'un microscope électronique de type "IOMAT" avec un agrandissement "x 1000".

# IV EXPERIENCES - RESULTATS ET INTERPRETATIONS

## IV 1 Expériences.

Le mode opératoire des expériences consistait à changer le régime de trempe pour les différentes pièces à traiter en agissant d'une part sur la puissance de chauffage "P", et d'autre part sur la vitesse d'avance "v" des pièces à travers l'inducteur.

Première série de pièces : - Vitesse constante et égale à 5 mm/s  
- Puissance variable de 38,5 kW à 85 kW

Deuxième série de pièces : - Puissance constante et égale à 67,5 kW  
- Vitesse variable de 4 mm/s à 7 mm/s.

Les dimensions de l'inducteur monospire utilisé durant les opérations de trempe sont les suivantes :

Diamètre 42 [mm] ; Hauteur 10,5 [mm]

## IV 2. Résultats et Interprétations.

Les mesures de dureté Vickers, réalisées en déplaçant le pénétrateur de quelques dixièmes de millimètres à travers la section de chaque pièce, à partir du bord de celle-ci jusqu'à son cœur, ont donné les résultats dressés sur les tableaux qui suivent.



Première série de pièces trempées - régime :  $v = 5 \text{ mm/s}$ ,  $P = \text{variable}$

e[mm]	0,2	0,5	0,7	0,9	1,2	1,6	1,9	2,1	2,3	2,5
HV	578	561	510	348	247	223	223	223	223	223

Résultats pour  $P = U \cdot I = 7 \times 5,5 = 38,5 \text{ kW}$ .

e[mm]	0,4	0,8	1,0	1,2	1,6	2,2	2,5	2,8	3,1	3,5
HV	639	617	639	526	348	223	223	223	223	223

Résultats pour  $P = U \cdot I = 8 \times 6,5 = 52 \text{ kW}$ .

e[mm]	0,1	0,4	1,0	1,3	1,6	1,8	2,5	2,9	3,2	3,5
HV	660	683	683	617	454	365	232	223	223	223

Résultats pour  $P = U \cdot I = 9 \times 7,5 = 67,5 \text{ kW}$ .

e[mm]	0,2	0,8	1,2	1,6	2,0	2,5	2,9	3,6	4,0	4,5
HV	762	762	762	762	707	526	510	331	275	223

Résultats pour  $P = U \cdot I = 10 \times 8,5 = 85 \text{ kW}$ .

Deuxième série de pièces trempées - régime :  $P = 67,5 \text{ W}$ ,  $v = \text{variable}$

e[mm]	0,1	0,5	1,0	1,4	2,0	2,4	3,0	3,6	4,2	4,7
HV	683	683	707	707	578	454	429	348	247	223

Résultats pour  $v = 4 \text{ mm/s}$

e[mm]	0,1	0,4	1,0	1,3	1,6	1,8	2,6	2,9	3,2	3,5
HV	660	683	683	617	454	365	232	223	223	223

Résultats Pour  $v = 5 \text{ mm/s}$

e[mm]	0,2	0,5	0,9	1,2	1,5	1,8	2,5	2,8	3,0	3,2
HV	660	639	639	561	454	288	223	223	223	223

Résultats Pour  $v = 6 \text{ mm/s}$

e[mm]	0,3	0,4	0,7	1,0	1,4	1,5	1,8	2,1	2,3	2,5
HV	639	617	617	596	396	263	236	223	223	223

Résultats Pour  $v = 7 \text{ mm/s}$ .

### IV 3. Evolution de la dureté suivant la section des Pièces trempées.

#### IV 31 - Remarque:

des pièces (Axes de Ressort) étant de forme cylindrique (fig III 12), les figures (IV 13 et IV 14) tracées à partir des résultats précédents peuvent être prolongées par symétrie comme le montre la figure (IV 15).

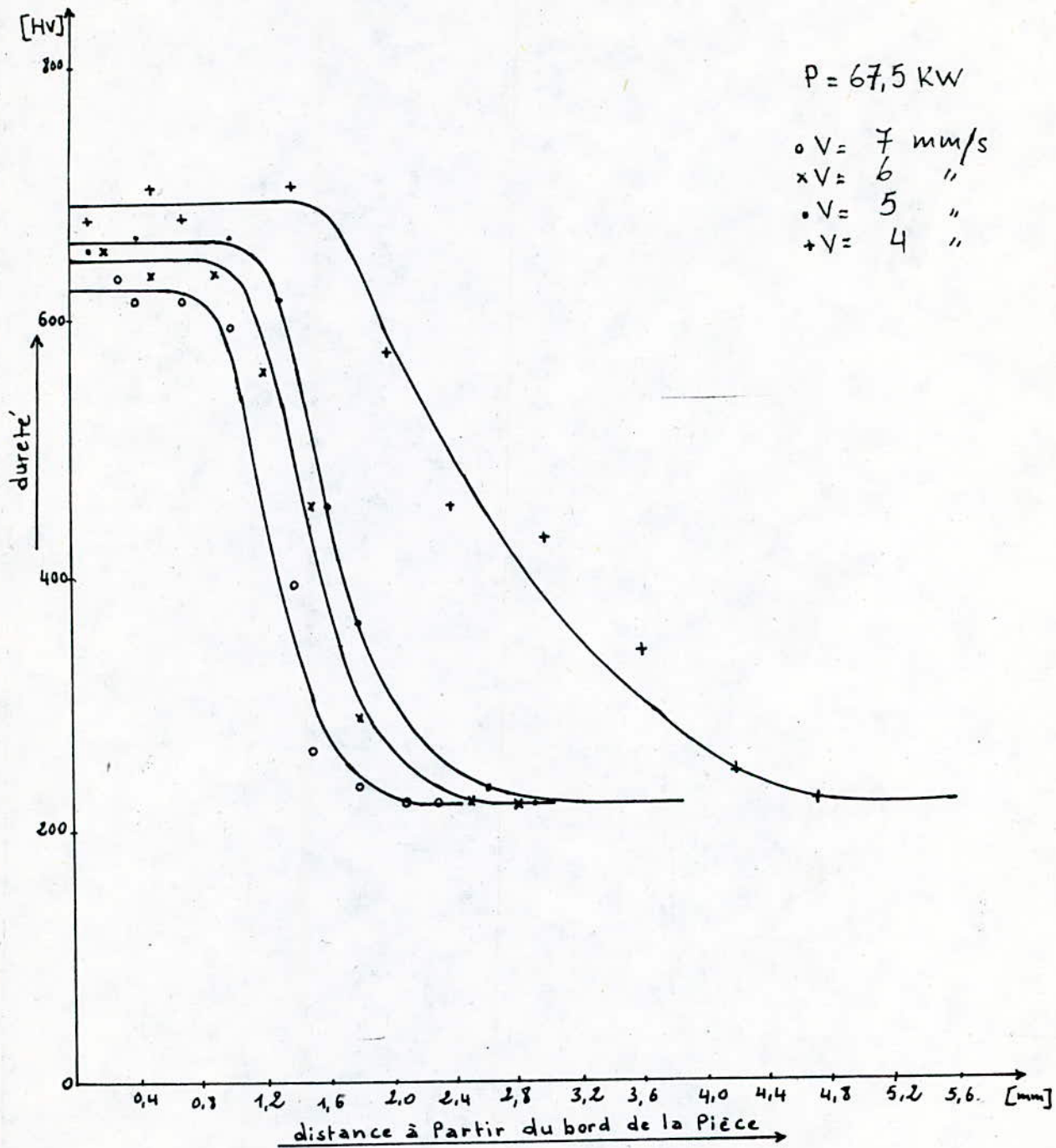


fig IV 13. Evolution de la dureté suivant la section de la Pièce

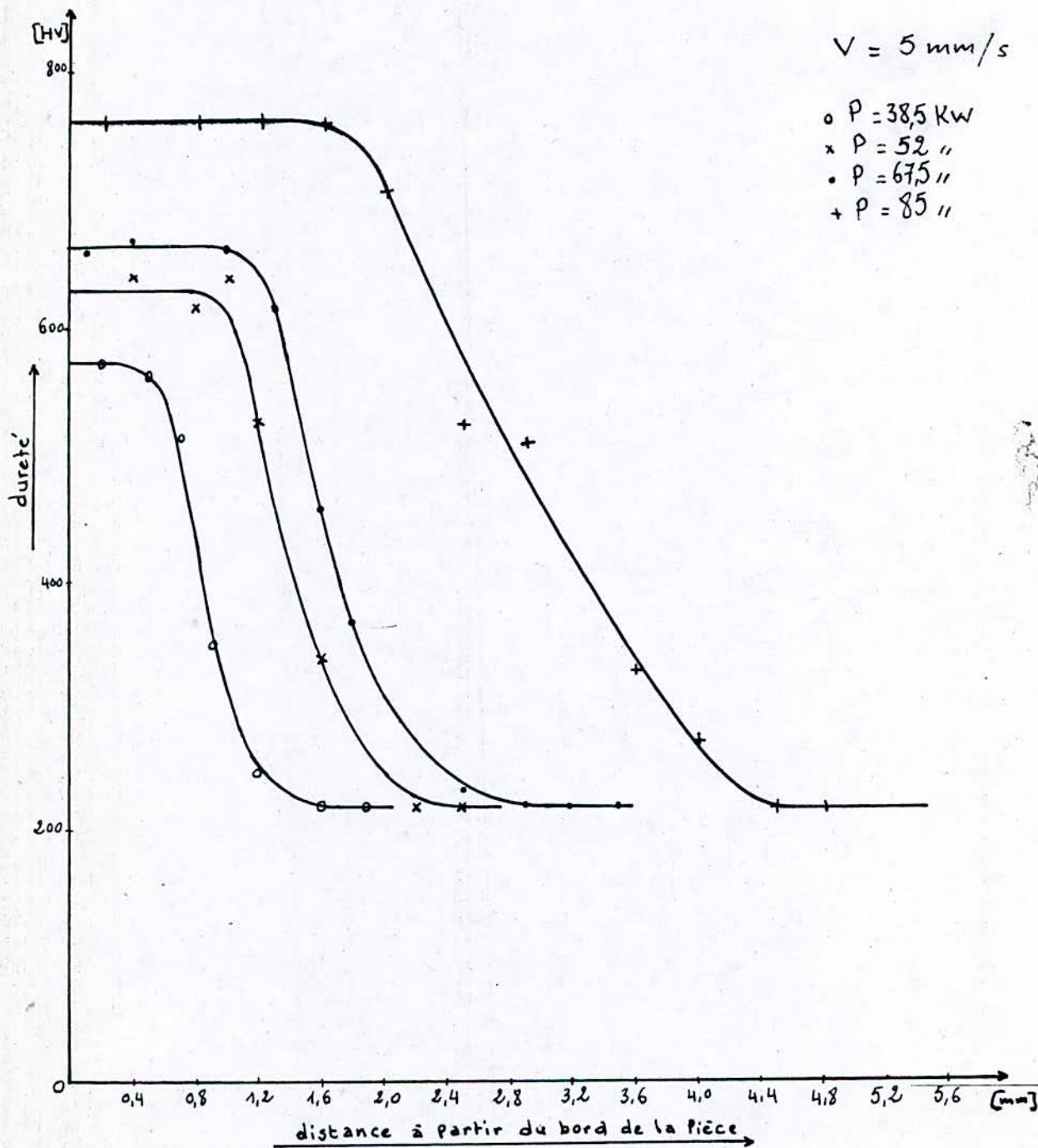


fig III 14. Evolution de la dureté suivant la section de la pièce

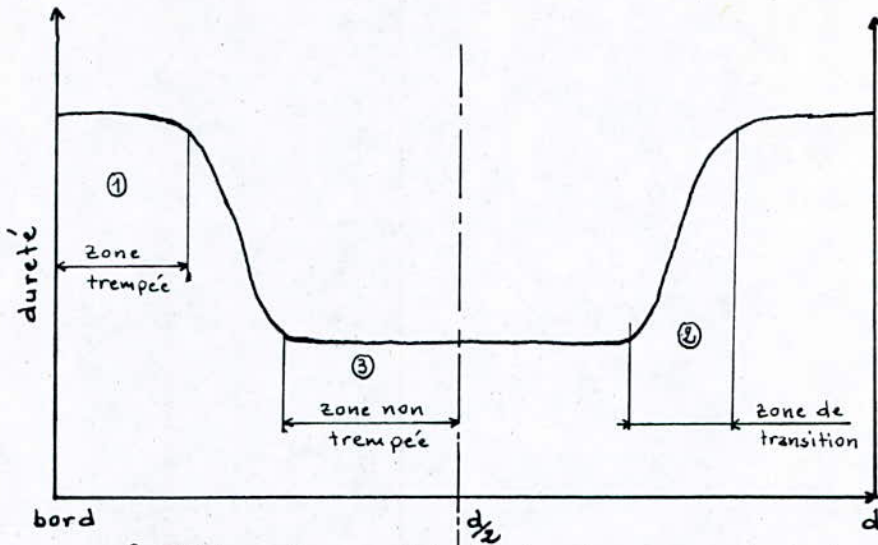


fig IV.15. Schéma général du changement de la dureté suivant la section de la pièce

#### IV 32. observations .

Les figures (IV.13 et IV.14) montrent l'existence de trois zones différentes l'une de l'autre.

Zone ① : C'est une zone de dureté élevée qui doit résister à l'usure. Elle caractérise aussi la profondeur de pénétration de la trempe .

Zone ② : C'est la zone de transition .

Zone ③ : C'est la partie non trempée de la pièce qui doit conserver les propriétés ductiles et résilientes pour perfectionner le travail des pièces sous l'action de charges dynamiques et chocs .

#### IV 4. Influence de la Puissance sur la dureté et sur la Pénétration de trempe.

A partir des zones trempées (fig IV 15), les courbes de la figure (IV 13) nous ont permis d'évaluer la pénétration de trempe ( $\delta$ ) et de déterminer la dureté Vickers moyenne de la couche superficielle de chaque pièce traitée. Le tableau (III 2) nous donne les valeurs des duretés Vickers en duretés Rockwell. Les résultats sont les suivants :

Régime de trempe :  $v = 5 \text{ mm/s}$ ,  $P = \text{variable}$ .

P [kW]	Hv moy	HRC moy	$\delta$ [mm]
38,5	575	52,5	0,5
52	630	55,5	1
67,5	665	57	1,2
85	762	61	1,8

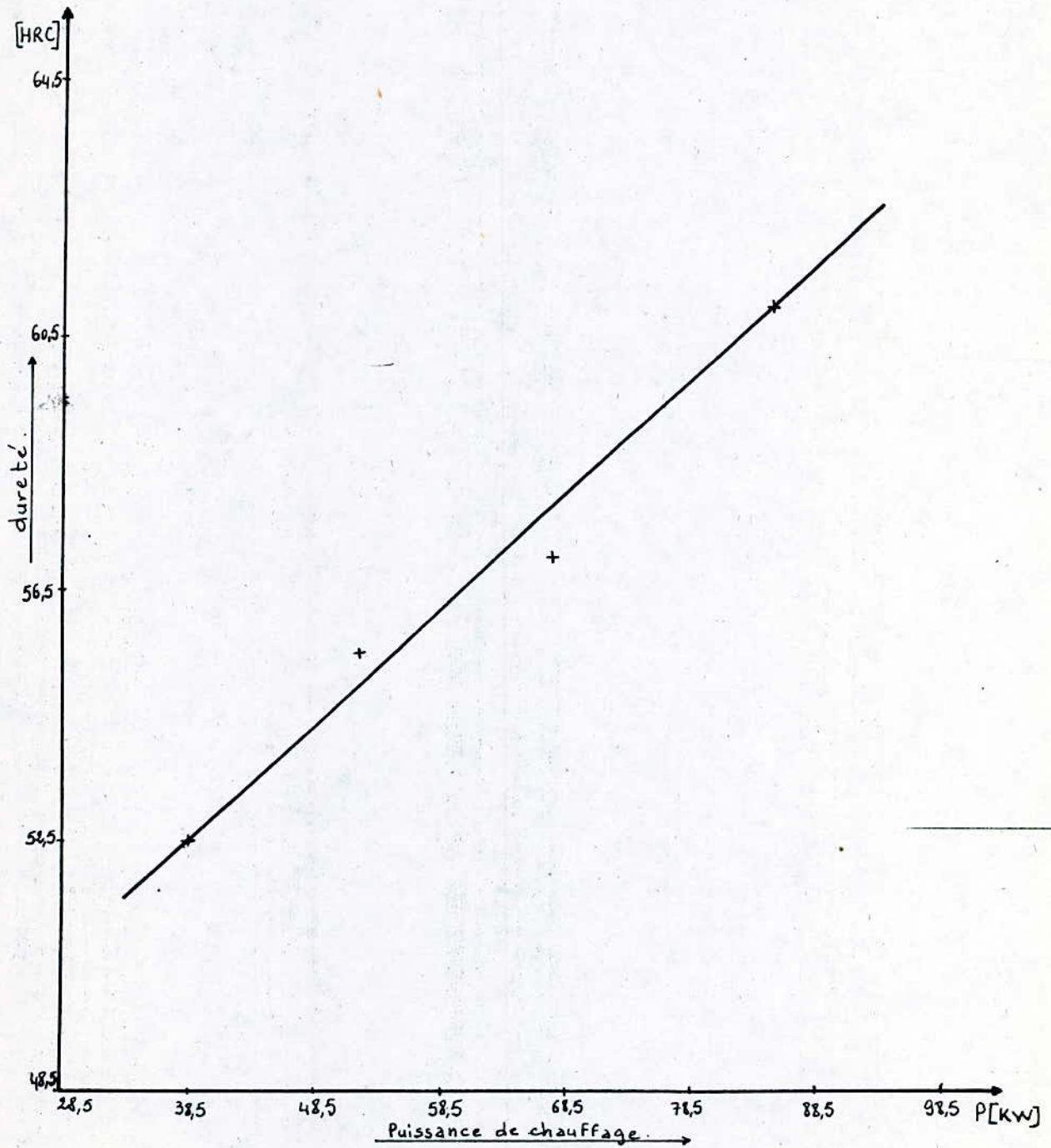


fig. II 16. Evolution de la dureté de la couche superficielle en fonction de la Puissance de chauffage.

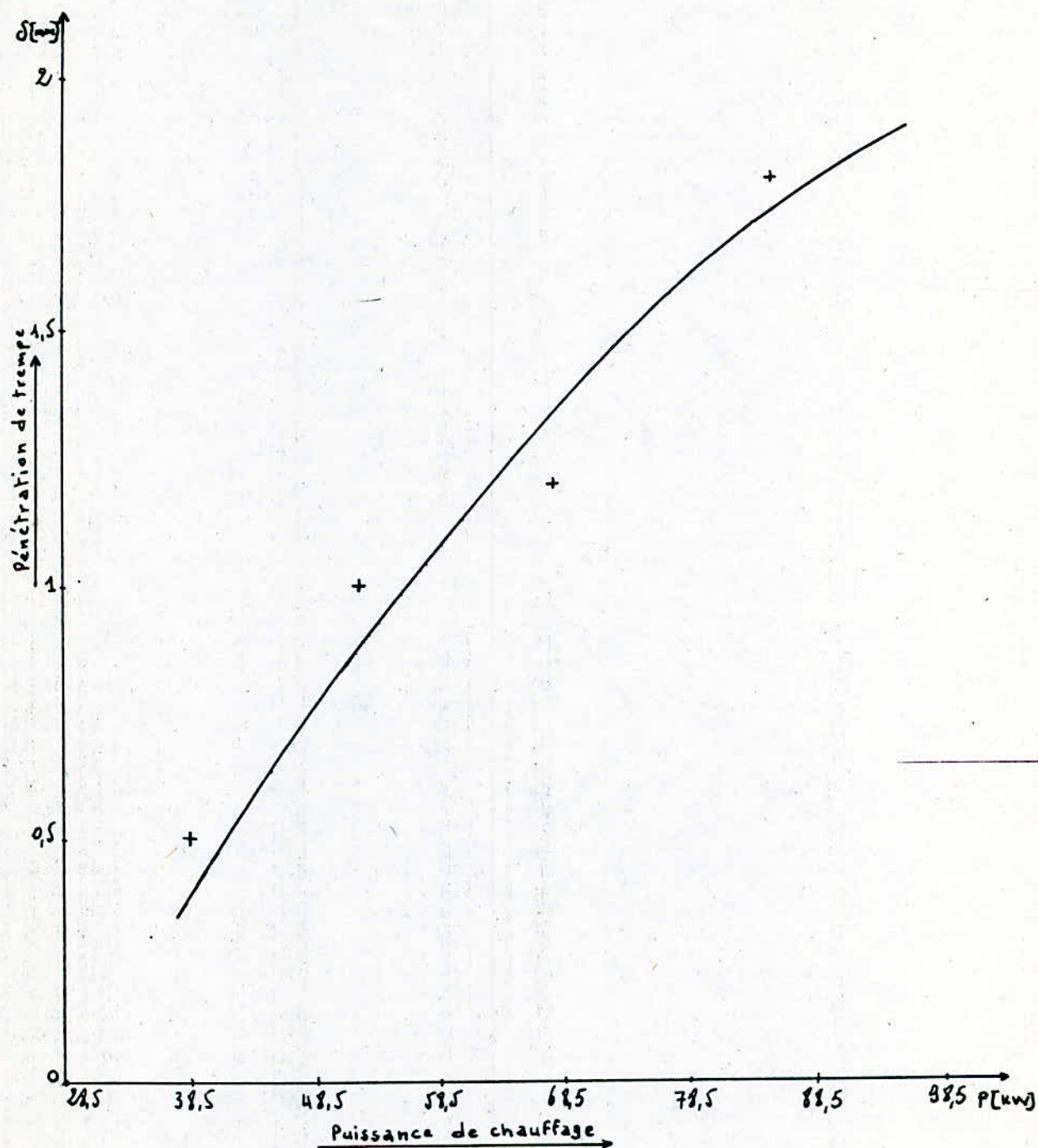


fig III 17. Evolution de la Profondeur de Pénétration de trempe  
en fonction de la Puissance de chauffage.



Observations .

des figures (IV<sub>16</sub> et IV<sub>17</sub>) montrent l'effet de la puissance sur la dureté et sur la pénétration de trempe. On constate que plus la puissance augmente plus la dureté est élevée et la pénétration de trempe est plus importante. En fait une puissance élevée permet d'obtenir la quantité d'énergie nécessaire à la transformation de la structure du métal.

#### IV 5. Influence de la vitesse d'avance des Pièces

Sur la dureté et la Pénétration de trempe.

La même méthode graphique du paragraphe (IV<sub>4</sub>) appliquée aux courbes de la figure (IV<sub>14</sub>) nous a conduit aux résultats suivants :

Régime de trempe :  $P = 67,5 \text{ kW}$  ,  $v = \text{variable}$ .

$V$ [mm/s]	$HV_{\text{moy}}$	$HRC_{\text{moy}}$	$S$ [mm]
4	695	58,5	1,6
5	675	57,5	1,2
6	650	56,5	1,0
7	630	55,5	0,9

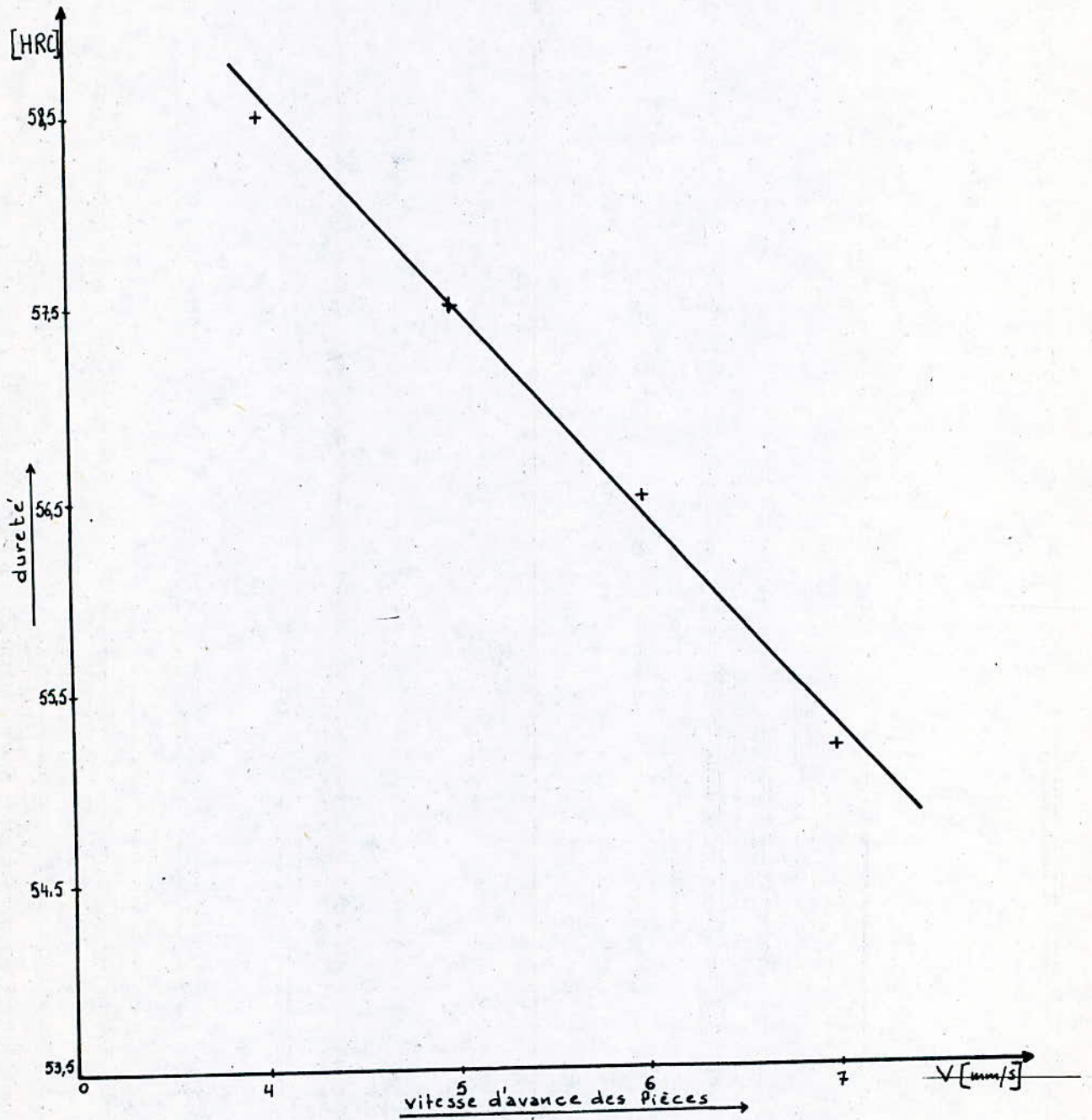


fig. IV 18. Evolution de la dureté de la couche superficielle en fonction de la vitesse d'avance.

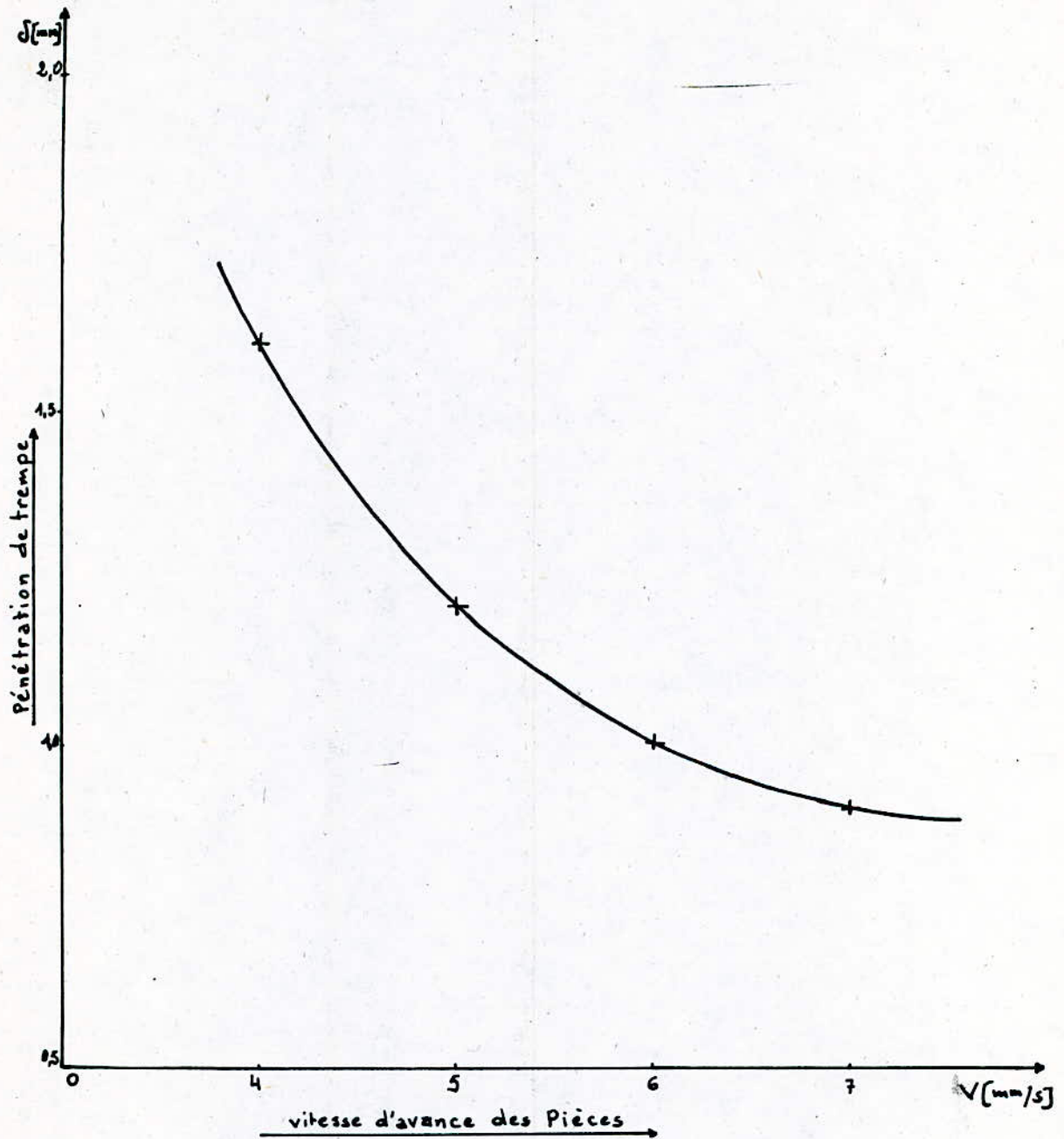


fig II 19. Evolution de la Profondeur de Pénétration de trempe en fonction de la vitesse d'avance .

### Observations.

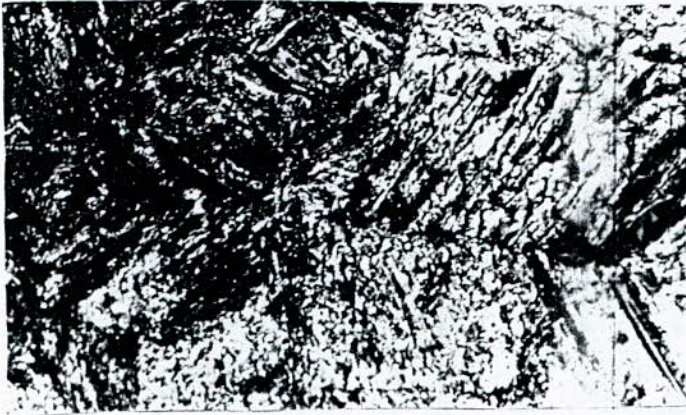
Les figures (IV<sup>18</sup> et IV<sup>19</sup>) montrent l'influence de la vitesse d'avance des pièces, à travers l'inducteur, sur la dureté et sur la pénétration de trempe. On remarque qu'à mesure que cette vitesse augmente la dureté et la pénétration de trempe diminuent. Le phénomène est explicable, car si la vitesse d'avance des pièces à travers l'inducteur est élevée le temps de chauffage est faible, donc la chaleur est insuffisante pour la transformation complète du métal. On peut constater par exemple que la vitesse de 7 mm/s provoque partiellement le changement de la structure dans une couche superficielle (dureté faible < 57 HRC).

### IV 6. Recommandations.

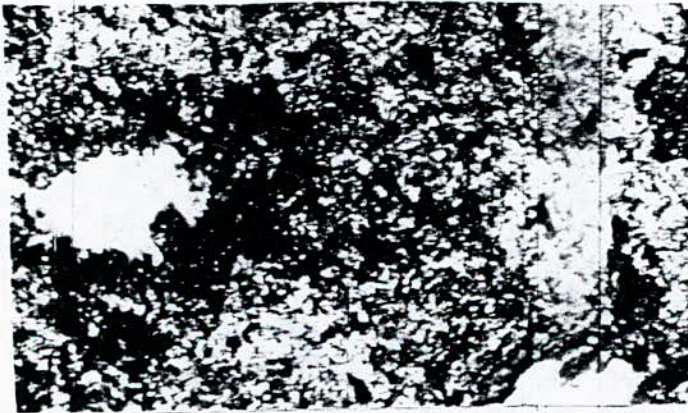
D'après les résultats expérimentaux obtenus, nous concluons que le régime de la machine adopté par la "SONACOME", et qui est de " 67,5 KW, 4 mm/s", pour la trempe des pièces étudiées (Axes de ressort) peut être modifié et remplacé par le régime " 85 KW, 5 mm/s" qui nous a donné les résultats exigés par les cahiers des charges pour ces pièces mécaniques.

Le but envisagé par ce choix est avant tout économique et rentable pour la société, car en augmentant la vitesse, le rendement de l'installation augmente et la production également.

## IV 7. Microstructures



Structure  
Martensitique de la  
couche Superficielle



structure  
Martensite + Ferrite  
de la zone intermédiaire



structure  
Ferrite - Perlitique  
au coeur (métal de base)

fig IV.20 changement de la Structure suivant la section  
d'une pièce trempée. (Aggrandissement x1000)

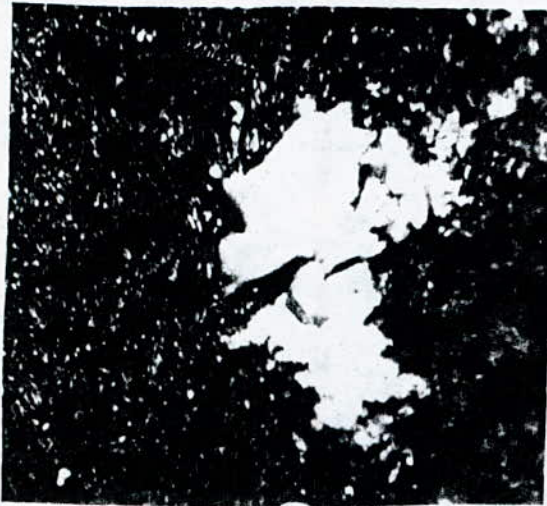
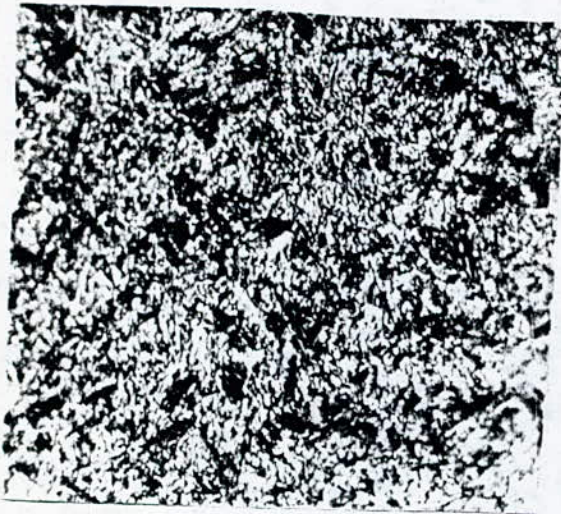
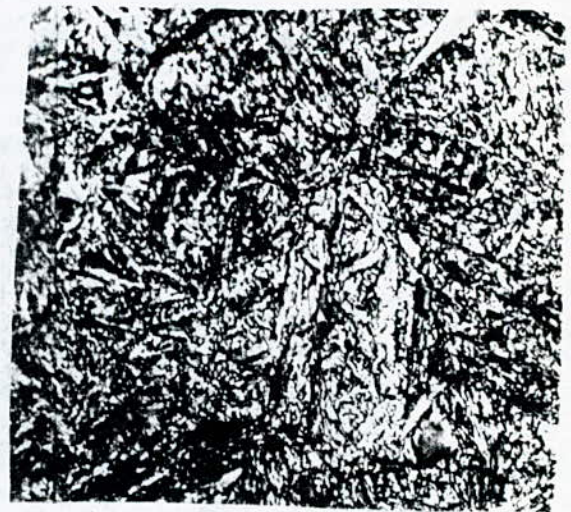
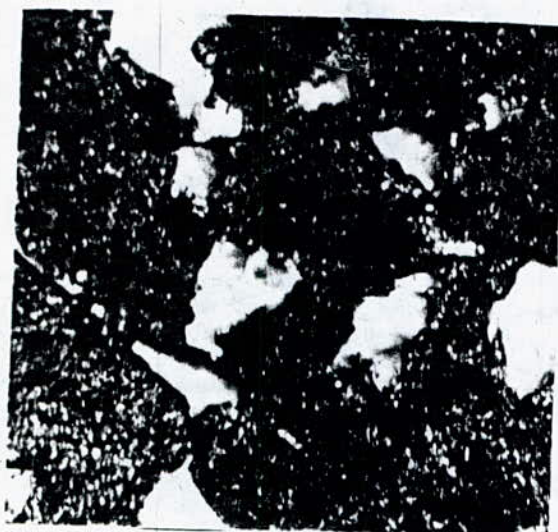
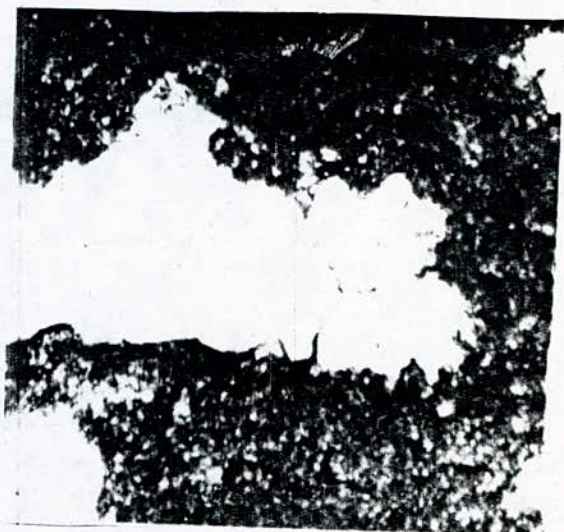
Puissance  $P = 38,5 \text{ kW}$ Puissance  $P = 52 \text{ kW}$ Puissance  $P = 67,5 \text{ kW}$ Puissance  $P = 85 \text{ kW}$ 

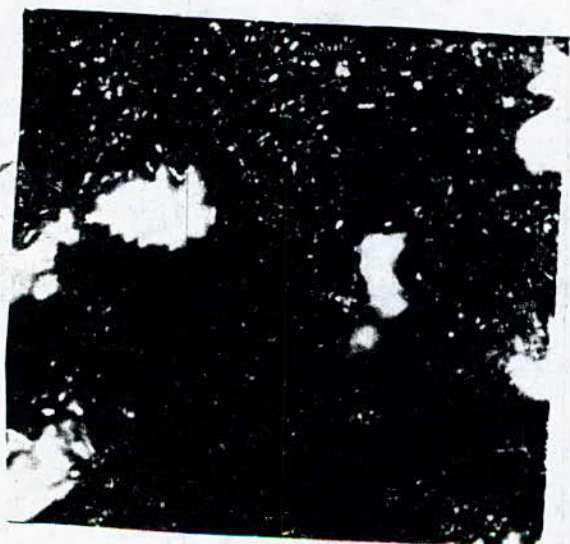
fig IV 21. Influence de la Puissance sur la Structure  
des Pièces trempées



vitesse  $v = 7 \text{ mm/s}$



vitesse  $v = 6 \text{ mm/s}$



vitesse  $v = 5 \text{ mm/s}$



vitesse  $v = 4 \text{ mm/s}$

fig IV 22. Influence de la vitesse d'avance sur la structure des pièces trempées

## Observations.

La microstructure des échantillons montre que l'utilisation d'une puissance inférieure à "67,5 kW" ne permet pas d'obtenir la structure austénitique dans une couche superficielle avec la vitesse de "5 mm/s". C'est pourquoi dans une couche superficielle, la structure après la trempe contient la martensite et la ferrite. La présence de grains ferritiques diminuent la dureté. On constate également que les puissances "67,5 kW et 85 kW" avec les vitesses respectives de "4 mm/s et 5 mm/s" permettent d'obtenir la pénétration de trempe et le niveau de dureté nécessaires. L'augmentation de la puissance provoque l'augmentation de grains martensitiques et une diminution du pourcentage de ferrite dans une zone intermédiaire. Par contre l'augmentation de la vitesse augmente la quantité de ferrite dans une couche intermédiaire.



## V PRESENTATION DE LA MACHINE DE TREMPE

la machine sur laquelle les expériences ont été réalisées et objet du présent descriptif est l'une des machines de trempe par induction installée par la "SONACOME" aux ateliers de traitements thermiques.

### V<sub>1</sub>. Schéma principal de la machine.

La figure (V 20) représente schématiquement le procédé de trempe superficielle de la machine. Des pièces à traiter "①", distribuées automatiquement sur les rouleaux supports de pièces "⑤" sont guidées à travers l'inducteur "②" à l'aide du poussoir "③". A ce niveau, elles subissent le chauffage et simultanément la trempe à l'eau. Après cette opération de refroidissement, les pièces trempées sont déplacées manuellement sur les rouleaux "④", soumises à un arrosage anti-rouille puis recueillies dans un chariot "⑬" placé à cet effet à la fin du cycle de traitement.

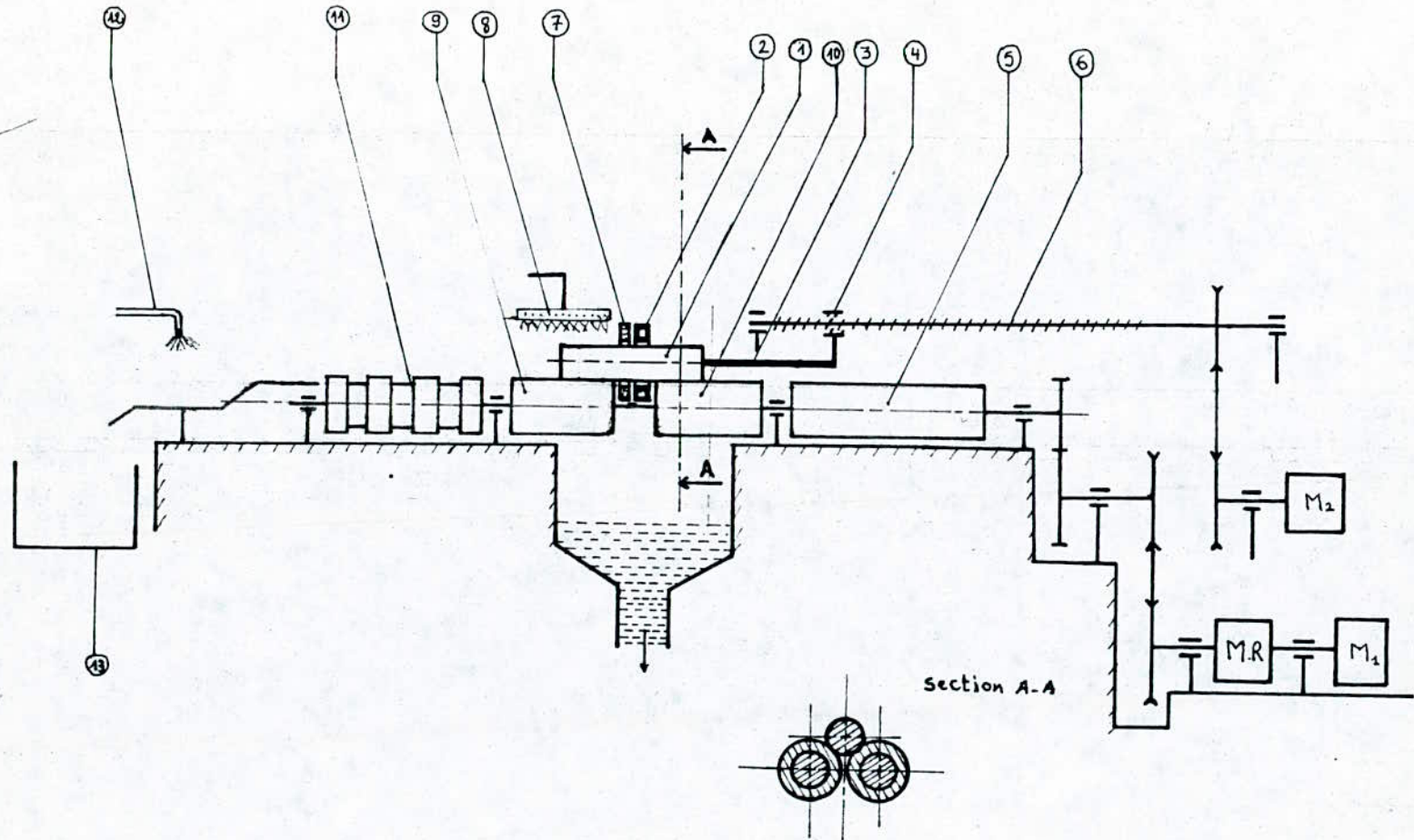


fig. V 23. Schéma Principal de la machine de trempe

Repère	Désignation
①	Pièce à traiter.
②	Inducteur.
③	Poussoir.
④	Ecrou.
⑤, ⑨, ⑪	Rouleurs supports de pièces.
⑥	Vis mère.
⑦	Anneau de douche (trempé)
⑧	Arroseur d'eau (trempé)
⑫	Arroseur anti-rouille.
⑬	chariot.
M <sub>1</sub>	Moteur à courant triphasé
M <sub>2</sub>	Moteur à courant continu
M.R	Moto. réducteur de vitesse.

## V 2. Caractéristiques techniques.

Les capacités techniques de la machine sont les suivantes :

- longueur maximum des pièces pouvant être traitées: 750 mm
- " minimum " " " " " " : 100 mm
- Diamètre maximum " " " " " : 60 mm
- Vitesse de traitement avec réglage continu de 4 à 120 mm/s

couple d'engrenage, de réduction totale égale à un, nous donne la vitesse constante des rouleaux supports de pièces et égale à 50 tr/min.

- Vitesse fixe de dégagement rapide et de retour du poussoir 1,20 m/s
- Vitesse fixe de rotation des rouleaux 50 tr/mn.
- Moteur de rotation des rouleaux :
  - .  $P = 0,18$  KW à 1500 tr/mn.
  - . Alimentation 380 V triphasé 50 Hz.
- Moteur de commande du poussoir.
  - .  $P = 0,74$  KW à 3000 tr/mn.
  - . Alimentation 140 V continu.

### V 3. Principe de fonctionnement.

#### V 3.1. Dispositif d'approvisionnement des Pièces.

Le chargement des pièces à tremper sur les rouleaux est commandé par un vérin relié à un appareillage pneumatique. Après avoir effectué les réglages nécessaires en fonction de la longueur et du diamètre des pièces à traiter, celles-ci disposées sur le plan incliné de chargement sont distribuées une à une sur les rouleaux lorsque le poussoir d'avance des pièces est revenu en position de recul maximum.

### V<sub>32</sub>. Mécanisme d'avance des Pièces

Le mouvement d'avance et de recul du poussoir est commandé par un moteur à courant continu qui entraîne une vis mère par l'intermédiaire d'une transmission par courroie crantée. L'écron support-poussoir, monté sur la vis mère qui est animée d'un mouvement de rotation, se déplace sur celle-ci à deux vitesses prévues au défilement :

- Une vitesse de traitement réglable (4 à 120 mm/s).
- Une vitesse rapide de dégagement (120 mm/s), utilisée pour l'avance sur les zones non prévues pour la trempe, et dans le sens du retour du poussoir qui, arrivé à son point arrière de recul maximum, permet l'alimentation d'une nouvelle pièce.

### V<sub>33</sub>. Mécanisme de rotation des rouleaux Supports des Pièces.

La chaîne cinématique du dispositif comprend, un moteur à courant triphasé donnant une vitesse de 1500 tr/mn qui est réduite jusqu'à 50 tr/mn grâce à un moto-réducteur à vis sans fin. Une transmission par courroie suivie d'un

# VI CALCUL DU MOTOREDUCTEUR DE ROTATION DES ROULAUX

## VI<sub>1</sub> Caractéristiques du motoreducteur

C'est un réducteur à vis sans fin dont les données sont :

- Puissance à transmettre  $P = 0,18 \text{ kW}$ .
- Rapport de réduction  $i = 30$ .
- Vitesse de rotation du moteur :  $1500 \text{ tr/min}$ .

## VI<sub>2</sub> Calcul cinématique des engrenages.

La méthode appliquée dans tous le calcul est celle qui est proposée par G. HENRIOT.

• Nombre de filets de la vis :

En fonction du rapport de réduction, le docteur W.A. Triplin a établi les valeurs pratiques suivantes :

Rapport	Au dessus de 40	22 à 40	15 à 22	10 à 15	8 à 10	6 à 8	5 à 6	4 à 5	3,5 à 4	3 à 3,5
Nombre de filets	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Pour notre cas  $i = 30$  donc  $z_1 = 2$  filets.

- Détermination des caractéristiques géométriques.
- de module :

La roue est en général l'organe le plus faible de point de vue résistance, donc le calcul est basé sur les dents de celle-ci.

$$m_n \geq 10 \sqrt[3]{\frac{11 P}{K \sigma_b z_2 \omega_2}}$$

$P$  : Puissance à transmettre.

$K$  : Coefficient.  $K = 8 \text{ à } 10$ .

$\sigma_b$  : Contrainte admissible du matériau.

$z_2$  : Nombre de dents de la roue.

$\omega_2$  : Vitesse angulaire de la roue.

Prenons  $K = 10$ .

La roue est en bronze allié.  $\sigma_b = 83 \text{ N/mm}^2$ .

$$i = \frac{z_2}{z_1} \Rightarrow z_2 = i \cdot z_1 = 30 \times 2 = 60.$$

$$\omega_2 = \frac{\pi n_2}{30} \quad n_2 = \frac{1500}{30} = 50 \text{ tr/min} \Rightarrow \omega_2 = \frac{\pi \times 50}{30} = 5,23 \text{ rad/s}$$

$$m_n \geq 10 \sqrt[3]{\frac{11 \cdot 180}{10 \times 83 \times 60 \times 5,23}} \geq 1,97 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$m_n \geq 1,97 \text{ mm}$ . On prend  $m_n = 2 \text{ mm}$  (Normalisé)



Pour une question de rendement du réducteur, on adopte comme inclinaison primitive du filet de vis par rapport à l'axe l'angle  $\beta_1 = 80^\circ$ .

On prend aussi comme angle de pression réel  $\alpha_n = 20^\circ$ .  
Les éléments des dentures sont les suivants.

Symbole	Désignation	Calcul
$m_n$	module réel	$m_n = 2 \text{ mm}$
$\beta_1$	inclinaison primitive du filet de la vis.	$\beta_1 = 80^\circ$
$P_n$	Pas réel	$P_n = \pi \times m_n = \pi \times 2 = 6,28 \text{ mm}$
$P_{t_1}$	Pas apparent de la vis	$P_{t_1} = \frac{P_n}{\cos \beta_1} = \frac{6,28}{\cos 80} = 36,16 \text{ mm}$
$m_{x_1}$	module axial de la vis	$m_{x_1} = \frac{m_n}{\sin \beta_1} = \frac{2}{\sin 80} = 2,03 \text{ mm}$
$P_{x_1}$	Pas axial de la vis	$P_{x_1} = \pi \cdot m_{x_1} = \pi \times 2,03 = 6,38 \text{ mm}$
$P_{z_1}$	Pas hélicoïdal de la vis	$P_{z_1} = z_1 \cdot P_{x_1} = 2 \times 6,38 = 12,76 \text{ mm}$
$m_{t_1}$	module apparent de la vis	$m_{t_1} = \frac{m_n}{\cos \beta_1} = \frac{2}{\cos 80} = 11,52 \text{ mm}$
$z$	nombre de dents ou de filets	$z_1 = 2$
		$z_2 = 60$
$d$	diamètre primitif	$d_1 = z_1 \cdot m_{t_1} = 2 \times 11,52 = 23,04 \text{ mm}$
		$d_2 = z_2 \cdot m_{x_1} = 60 \times 2,03 = 121,80 \text{ mm}$
$d_a$	diamètre de tête	$d_{a_1} = d_1 + 2m_{x_1} = 23,04 + 2 \times 2,03 = 27,09 \text{ mm}$
		$d_{a_2} = d_2 + 2m_{x_1} = 121,8 + 2 \times 2,03 = 125,86 \text{ mm}$

$d_f$	diamètre de pied	$d_{f1} = d_1 - 2,4 m x_1 = 23,04 - 2,4 \times 2,03 = 18,16 \text{ mm}$
		$d_{f2} = d_2 - 2,4 m x_1 = 121,8 - 2,4 \times 2,03 = 116,93 \text{ mm}$
$h_a$	Saillie	$h_a = m x_1 = 2,03 \text{ mm}$
$h_f$	Creux	$h_f = 1,2 m x_1 = 1,2 \times 2,03 = 2,44 \text{ mm}$
$h$	hauteur de dent	$h = h_a + h_f = 2,2 m x_1 = 2,2 \times 2,03 = 4,47 \text{ mm}$
$b_1$	longueur de la vis	$b_1 = \sqrt{8 \cdot d_2 \cdot h_a} = \sqrt{8 \cdot 121,8 \cdot 2,03} = 44,47 \text{ mm}$
$q_1$		$q_1 = \frac{d_1}{m x_1} = \frac{23,04}{2,03} = 11,35$
$b_2$	largeur de la roue	$b_2 = 2,3 m x_1 \sqrt{q_1 + 1} = 2,3 \times 2,03 \sqrt{11,35 + 1} = 16,42 \text{ mm}$
$a$	entraxe	$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{23,04 + 121,80}{2} = 72,42 \text{ mm}$
$\gamma_1$	angle de Pas	$\gamma_1 = \frac{\pi}{2} - \beta_1 = 90 - 80 = 10^\circ$
$d_n$	angle de pression réel	$d_n = 20^\circ$
$d_{x_1}$	angle de pression axial de la vis	$d_{x_1} = \text{Arctg} \left( \frac{\text{tg} d_n}{\sin \beta_1} \right) = \text{Arctg} \left( \frac{\text{tg} 20}{\sin 80} \right) = 20,28^\circ$
$d_{t_1}$	angle de pression apparent de la vis	$d_{t_1} = \text{Arctg} \left( \frac{\text{tg} d_n}{\cos \beta_1} \right) = \text{Arctg} \left( \frac{\text{tg} 20}{\cos 80} \right) = 64,49^\circ$
$\beta_{b_1}$	inclinaison de base du filet de la vis	$\beta_{b_1} = \text{Arctg} \left( \text{tg} \beta_n \cos d_{t_1} \right) = \text{Arctg} \left( \text{tg} 80 \cdot \cos 64,49 \right) = 67,73^\circ$
$\omega$	vitesse angulaire	$\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30} = \frac{\pi \times 1500}{30} = 157,08 \text{ rad/s.}$
		$\omega_2 = \frac{\pi n_2}{30} = \frac{\pi \times 50}{30} = 5,23 \text{ rad/s.}$

### VI 3. Calcul dynamique des engrenages.

Avec les engrenages à vis sans fin, avec vis en Acier allié et roue en Bronze spécial allié, c'est la roue qui est en général l'organe le plus faible et le plus exposé aux détériorations superficielles.

#### VI 31. Vérification des dentures à la rupture.

L'effort tangentiel admissible sur la roue est donné par la relation :

$$F'_{t2ad} = 3,6 \cdot \sigma_{b2lim} \cdot b_2 \cdot m_n \cdot K_{vL2} \cdot K_M \cdot K_A \quad [7]$$

Dans cette formule :

$$F'_{t2ad} = [\text{dan}]$$

$\sigma_{b2lim}$  : contrainte limite de base pour le matériau de la roue.

$$\sigma_{b2lim} = 8,3 \text{ dan/mm}^2 \text{ (Bronze spécial allié)}.$$

$$b_2 : \text{largeur de la roue en [mm]}. \quad b_2 = 16,41 \text{ mm}$$

$$m_n : \text{module réel en [mm]}. \quad m_n = 2 \text{ mm}.$$

$K_{vL2}$  : Facteur combiné de vitesse et de durée pour la roue.

Pour une durée de vie de 25000 h, la figure IX 1 sur Henriot

$$\text{donne : } K_{vL2} = 0,47.$$

$K_M$  : Facteur de portée .

$K_M = 1$  en supposant un engrenage correctement assemblé.

$K_A$  : Facteur d'application .

d'après les tableaux VIII<sub>2</sub>, VIII<sub>3</sub>, VIII<sub>4</sub> et la figure VIII 79 sur Henriot,  $K_A = 1,2$ .

Le calcul donnera donc :

$$F'_{t_{2ad}} = 3,6 \times 8,3 \times 16,41 \times 2 \times 0,47 \times 1 \times 1,2 = 553,09 \text{ dan}.$$

En multipliant cette valeur par 1,15 (proposition d'Henriot pour une valeur de  $b_2 = 2,3 m_{x_1} \sqrt{q_{1+1}}$ ) on aura :

$$F_{t_{2ad}} = 553,09 \times 1,15 = 636,05 \text{ dan}.$$

. Effort tangentiel sur la roue .

Dans le cas de la vis motrice, et avec un rendement du réducteur  $\eta_r = 0,75$ , l'effort tangentiel sur la roue est donné par la formule :

$$F_{t_2} = 0,98 \cdot 10^6 \frac{P_1 \cdot i \cdot \eta_r}{n_1 \cdot r_2} \quad [7]$$

dans cette relation :

$$P_1 [\text{kW}] ; n_1 [\text{tr/min}] ; r_2 [\text{mm}] ; F_{t_2} [\text{dan}]$$

le calcul donnera :

$$F_{t_2} = 0,98 \cdot 10^6 \frac{0,18 \cdot 30 \cdot 0,75}{1500 \cdot 60,9} = 43,45 \text{ dan}$$

$$F_{t2ad} = 636,05 \text{ dan} \quad ; \quad F_{t2} = 43,45 \text{ dan}.$$

$F_{t2} < F_{t2ad}$  donc la roue est vérifiée à la rupture, par conséquent le couple de dents est vérifié aussi.

### VI 32. Vérification des dentures à la pression superficielle.

d'effort tangentiel admissible sur la roue est donné par l'expression :

$$F'_{t2ad} = 0,36 \cdot A \cdot \Omega_{02} \cdot b_2 \cdot d_2^{0,8} \cdot K_{vH_2} \cdot K_L \cdot K_M \cdot K_A \quad [7]$$

Dans cette formule :

$$F'_{t2ad} = [\text{dan}]$$

$A$  : Facteur de correspondance entre ancienne et nouvelle édition.  $A \approx 0,77$  d'après la figure IX 2.

$\Omega_{02}$  : Facteur de résistance du matériau considéré.

$$\Omega_{02} \approx 4 \quad (\text{d'après le tableau IX 1}).$$

$d_2$  : Diamètre de la roue en [mm].  $d_2 = 121,80$ .

$K_{vH_2}$  : Facteur de vitesse.

$$K_{vH_2} \approx 0,13 \quad (\text{d'après la figure IX 3}).$$

$K_L$  : Facteur de durée.

Pour une durée de vie de 25000 h  $K_L = 1$ .

Le calcul donnera donc :

$$F'_{t_{rad}} = 0,36 \times 0,77 \times 4 \times 16,41 \times (121,8)^{0,8} \times 0,13 \times 1 \times 1 \times 1,2 = 132,31 \text{ dan}$$

En multipliant cette valeur par le coefficient 1,15 on aura :

$$F_{t_{rad}} = 132,31 \times 1,15 = 152,16 \text{ dan.}$$

$$F_{t_{rad}} = 152,16 \text{ dan} \quad ; \quad F_{t_2} = 43,45 \text{ dan.}$$

$F_{t_2} < F_{t_{rad}}$  donc la roue est vérifiée à la pression superficielle, en conséquence le couple de dents est vérifié aussi.

#### VI<sub>4</sub>. Calcul d'arbres.

Le calcul d'arbre est basé sur la détermination des efforts sur les dentures. La méthode appliquée est celle de G. Henriot relative aux engrenages à vis sans fin.

##### VI<sub>4</sub><sub>1</sub>. Efforts sur les dentures.

En sachant que la vis est l'organe moteur on aura :

• Effort tangentiel sur la roue ( $F_{t_2}$ ) :

$$F_{t_2} = 43,45 \text{ dan (déjà calculée)}$$

• Effort axial sur la roue ( $F_{x_2}$ ):

$$F_{x_2} = 1000 \frac{M_1}{r_1} \quad \text{ou} \quad F_{x_2} = [\text{dan}]; \quad M_1 [\text{dan.m}]; \quad r_1 = [\text{mm}]$$

$$M_1 = \frac{P_1}{\omega_1} = \frac{180}{157,08} = 1,14 \text{ N.m.}$$

donc :

$$F_{x_2} = 1000 \frac{0,114}{11,52} = 9,89 \text{ dan.}$$

• Effort radial sur la roue ( $F_r$ ):

$$F_r = F_{t_2} \cdot \tan \alpha_{x_1}$$

$$F_r = 43,45 \tan 20,28 = 16,05 \text{ dan.}$$

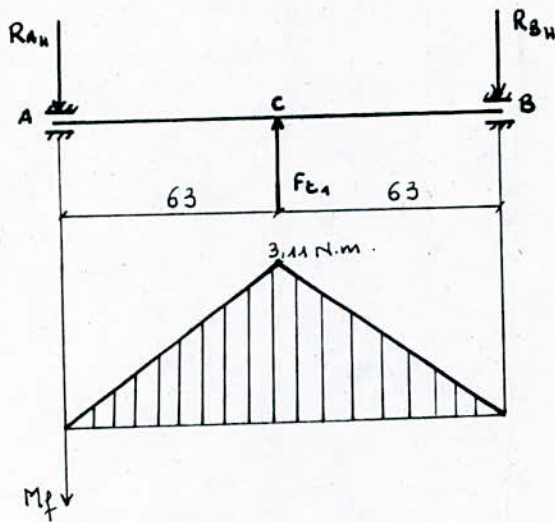
Nous avons évidemment :

- $F_{x_1}$  effort axial sur la vis : égal et opposé à  $F_{t_2}$ .
- $F_{t_1}$  effort tangentiel sur la vis : égal et opposé à  $F_{x_2}$ .
- $F_r$  effort radial sur la vis : égal et opposé à  $F_r$  sur roue.

## VI 42. calcul de l'arbre d'entrée.

on a estimé la distance entre les deux appuis de l'arbre égale à 126 mm.

• Plan horizontal.



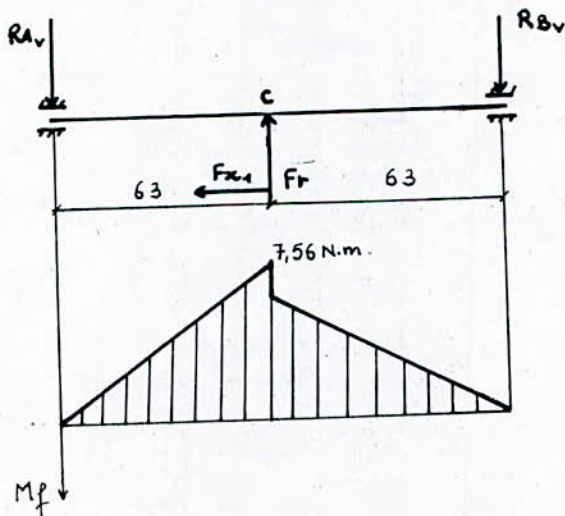
$$F_{c1} = 98,9 \text{ N}$$

$$R_{Ah} = 49,45 \text{ N}$$

$$R_{Bh} = 49,45 \text{ N}.$$

$$M_{fv}^{\max}(c) = 3,11 \text{ N.m.}$$

• Plan vertical.



$$F_r = 160,5 \text{ N}$$

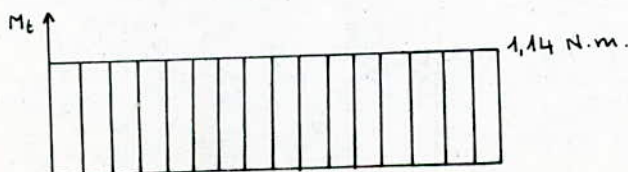
$$F_{x1} = 434,5 \text{ N}$$

$$R_{Av} = 119,98 \text{ N}$$

$$R_{Bv} = 40,52 \text{ N}.$$

$$M_{fv}^{\max}(c) = 7,56 \text{ N.m.}$$

• Moment de torsion.





Le moment de flexion résultant est :

$$M_{f_{\max}} = \sqrt{M_{f_{h_{\max}}}^2 + M_{f_{v_{\max}}}^2} = \sqrt{(3,11)^2 + (7,56)^2} = 8,17 \text{ N.m}$$

Le moment idéal au niveau de la section dangereuse est :

$$M_i = \sqrt{M_{f_{\max}}^2 + (\alpha M_t)^2} \quad \alpha : \text{coefficient correctif égal à 1}$$

donc :

$$M_i = \sqrt{8,17^2 + 1,14^2} = 8,25 \text{ N.m.}$$

Le diamètre de l'arbre est donné par la relation :

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{10 M_i}{\sigma_{ad}}}$$

où  $\sigma_{ad}$  est la contrainte admissible du matériau.  $\sigma_{ad} = (60 - 80 \text{ MPa})$

on prend  $\sigma_{ad} = 70 \text{ MPa}$  ;

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\frac{10 \times 8,25}{70 \cdot 10^6}} = 10,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$d_1 \geq 10,56 \text{ mm}$ . donc on prend  $d_1 = 20 \text{ mm}$

## VI 42. Calcul de l'arbre de Sortie.

la distance entre les deux appuis a été estimée à 78 mm.

L'arbre de sortie est aussi sollicité par un effort dû à la transmission par courroie. Cet effort est donné par la formule:

$$F_{cr}' = K F. \quad \text{où } K \text{ est égal à } 2,5 \text{ pour courroie trapézoïdale.}$$

$$F = \frac{P_2}{V_2} \quad \text{avec : } P_2 = P_1 \cdot \eta = 180 \times 0,75 = 135 \text{ W}$$

$$\text{et : } V_2 = \omega_2 \cdot r_2 = 5,23 \times 60,9 \cdot 10^{-3} = 0,32 \text{ m/s}$$

on aura donc :

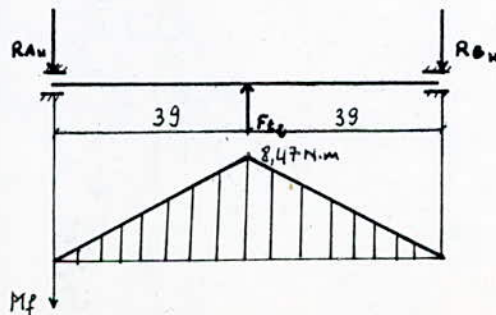
$$F = \frac{135}{0,32} = 421,87 \text{ N.}$$

$$\text{d'où : } F_{cr}' = 2,5 \times 421,87 = 1054,67 \text{ N.}$$

Et comme on a deux courroies trapézoïdales on aura

$$F_{cr} = 2 \times 1054,67 = 2109,34 \text{ N} \approx 210,93 \text{ daN.}$$

• Plan horizontal

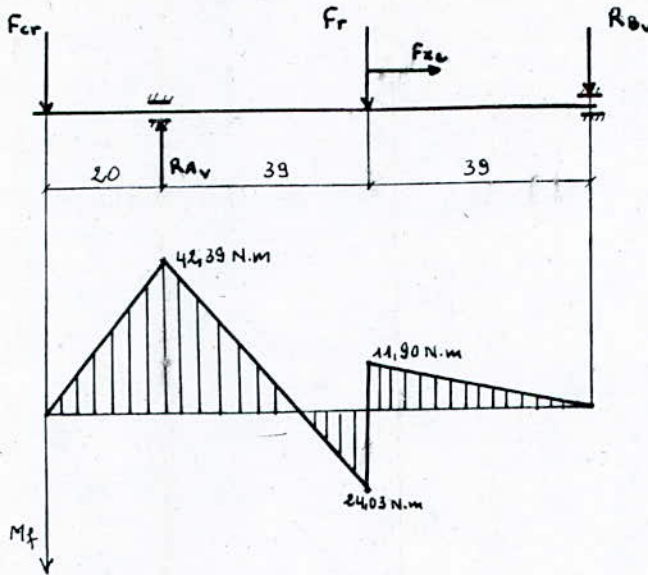


$$F_{c2} = 434,5 \text{ N}$$

$$R_{AH} = 217,25 \text{ N}$$

$$R_{BH} = 217,25 \text{ N}$$

. Plan vertical



$$F_r = 160,50 \text{ N}$$

$$F_{xe} = 98,90 \text{ N}$$

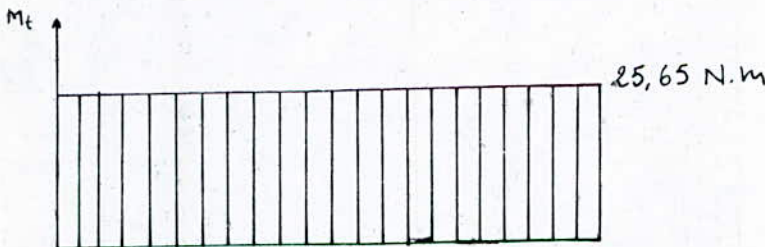
$$F_{cr} = 2109,34 \text{ N}$$

$$R_{A_v} = 2574,98 \text{ N}$$

$$R_{B_v} = 305,14 \text{ N}$$

le moment de torsion est :

$$M_{t2} = M_{t1} \cdot i \cdot p_n = 1,14 \times 30 \times 0,75 = 25,65 \text{ N.m}$$



le moment fléchissant maximum dans la section dangereuse

est :  $M_{fmax} = 42,39 \text{ N.m}$

le moment idéal sera donc :

$$M_i = \sqrt{42,39^2 + 25,65^2} = 49,55 \text{ N.m}$$

on prend  $\sigma_{ad} = 70 \text{ MPa}$ , ce qui nous donnera comme diamètre :

$$d_2 \geq \sqrt[3]{\frac{10 M_i}{\sigma_{ad}}} = \sqrt{\frac{10 \times 49,55}{70 \cdot 10^6}} = 19,20 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

$d_2 \geq 19,20 \text{ mm}$  ; on prend  $d_2 = 30 \text{ mm}$ .

## VI s. Vérification des arbres.

Les dimensions des arbres donnés par le calcul sont vérifiées pour déterminer les coefficients pratiques de sécurité dans les sections dangereuses.

La condition de sécurité est :

$$n = \frac{n_\sigma \cdot n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} \geq [n] \quad [8]$$

Dans cette expression,  $n_\sigma$  et  $n_\tau$  sont les coefficients de sécurité à la flexion et à la torsion,  $n$  et  $[n]$  sont respectivement le coefficient et le coefficient minimal de sécurité pratique.

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma \cdot \sigma_a + \psi_\sigma \cdot \sigma_m}{E_L \cdot E_s}} \quad ; \quad n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\frac{K_\tau \cdot \tau_a + \psi_\tau \cdot \tau_m}{E_L \cdot E_s}} \quad [8]$$

$$[n] = 1,5 \text{ à } 2,5.$$

on prend :  $K_{\sigma} = K_{\tau} = 1,5$  ;  $[\eta] = 2,5$ .  
 $\epsilon_2 = 0,75$  ;  $\epsilon_s = 0,9$ .

## VI 51 - Vérification de l'arbre d'entrée

Le diamètre de cet arbre étant de 20 mm, A. Chevalier donne les dimensions normalisées de la clavette parallèle correspondante ;

$$a = 6 \text{ mm} ; b = 6 \text{ mm} ; t = 3,5 \text{ mm}$$

le moment résistant à la flexion dans la section dangereuse est :

$$W_{fnet} = \frac{\pi d_1^3}{32} - \frac{at(d_1-t)^2}{2d_1} = \frac{\pi \times 2^3}{32} - \frac{0,6 \times 0,35(2-0,35)^2}{2 \times 2} = 0,64 \text{ cm}^3$$

la relation donnant le moment résistant à la torsion dans la section dangereuse est :

$$W_{tnet} = \frac{\pi d_1^3}{16} - \frac{at(d_1-t)^2}{2d_1} = \frac{\pi \times 2^3}{16} - \frac{0,6 \times 0,35(2-0,35)^2}{2 \times 2} = 1,43 \text{ cm}^3$$

la limite d'endurance par flexion  $\sigma_{-1} = 0,43 R_{\sigma}$ .

$$R_{\sigma} = 800 \text{ MPa} \Rightarrow \sigma_{-1} = 0,43 \times 800 = 344 \text{ MPa} = 3440 \text{ daN/cm}^2$$

la limite d'endurance par torsion est  $\tau_{-1} = 0,22 R_{\tau}$

$$\tau_{-1} = 0,22 \times 800 = 176 \text{ MPa} = 1760 \text{ daN/cm}^2$$

Pour un cycle symétrique :

$$\sigma_m = \tau_m = 0$$

$$\sigma_a = \frac{M_{\max}}{W_{\text{net}}} = \frac{817}{0,64} = 1276,56 \text{ N/cm}^2 \Rightarrow \sigma_a \approx 127,66 \text{ daN/cm}^2$$

$$\tau_a = \frac{M_t}{W_{t\text{net}}} = \frac{114}{1,43} = 79,72 \text{ N/cm}^2 \Rightarrow \tau_a \approx 7,97 \text{ daN/cm}^2$$

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma}{E_s \cdot E_s} \cdot \sigma_a} = \frac{3440}{\frac{1,5}{0,75 \cdot 0,9} \cdot 127,66} = 12,12$$

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\frac{K_\tau}{E_s \cdot E_s} \cdot \tau_a} = \frac{1760}{\frac{1,5}{0,75 \cdot 0,9} \cdot 7,97} = 99,37$$

donc le coefficient de sécurité pratique est :

$$n = \frac{n_\sigma \cdot n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} = \frac{12,12 \cdot 99,37}{\sqrt{12,12^2 + 99,37^2}} \approx 12$$

$$n = 12 \text{ or } [n] = 2,5. \text{ donc } n > [n]$$

## VI.5. Vérification de l'arbre de sortie.

Le calcul d'arbres nous a conduit à un diamètre  $d_2 = 30 \text{ mm}$

des dimensions normalisées de la clavette parallèle montée sur cet arbre sont :

$$a = 10 \text{ mm} ; b = 8 \text{ mm} ; t = 5 \text{ mm}$$

donc :

$$W_{\text{fnet}} = \frac{\pi \cdot d_e^3}{32} - \frac{a t (d_e - t)^2}{2 \times d_e} = \frac{\pi \cdot 3^3}{32} - \frac{1 \times 0,5 (3 - 0,5)}{2 \times 3} = 2,13 \text{ cm}^3$$

$$W_{\text{tnet}} = \frac{\pi \cdot d_e^3}{16} - \frac{a t (d_e - t)^2}{2 \times d_e} = \frac{\pi \cdot 3^3}{16} - \frac{1 \times 0,5 (3 - 0,5)}{2 \times 3} = 4,78 \text{ cm}^3$$

or :  $M_{\text{fmax}} = 42,39 \text{ N.m}$  et  $M_{\text{t}_2} = 25,65 \text{ N.m}$ .

Ce qui donnera :

$$\sigma_a = \frac{4239}{2,13} = 1990,10 \text{ N.cm} \Rightarrow \bar{\sigma}_a \approx 199,01 \text{ dan.cm}$$

$$\tau_a = \frac{2565}{4,78} = 536,61 \text{ N.cm} \Rightarrow \bar{\tau}_a \approx 53,66 \text{ dan.cm}$$

d'où :

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_\sigma}{E_c \cdot E_s} \cdot \bar{\sigma}_a} = \frac{3440}{\frac{1,5}{0,75 \times 0,9} \cdot 199,01} = 7,78$$

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\frac{k_\tau}{E_c \cdot E_s} \cdot \bar{\tau}_a} = \frac{1760}{\frac{1,5}{0,75 \times 0,9} \cdot 53,66} = 14,76$$

le coefficient de sécurité pratique sera :

$$n = \frac{n_\sigma \cdot n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} = \frac{7,78 \times 14,76}{\sqrt{7,78^2 + 14,76^2}} = 6,88$$

$n \approx 6,9$  or :  $[n] = 2,5$  donc  $n > [n]$

## VI 6. Calcul de Roulements.

La charge dynamique de base en  $[dan]$  est donnée par :

$$C = P \left( \frac{60 \cdot n \cdot L_h}{16666} \right)^{1/k}$$

où :

- $P$  : charge dynamique équivalente en  $[dan]$ .
- $n$  : Vitesse de rotation en  $[tr/min]$ .
- $L_h$  : durée de vie en  $[heures]$ .
- $k$  : Coefficient égal à 3 pour roulements à billes et  $\frac{10}{3}$  pour roulements à rouleaux.

La charge dynamique de base pour un roulement à bille est :

$$C = P \left( \frac{60 \cdot n \cdot L_h}{16666} \right)^{1/3} \quad \text{avec : } P = X \cdot V \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

où :

- $F_r$  : charge radiale en  $[dan]$
- $F_a$  : charge axiale en  $[dan]$
- $X$  : Facteur radial dépendant de  $\frac{F_a}{C_0}$  et  $F_a/F_r$ .
- $V$  : Facteur de rotation (égal à 1 pour roulements à billes).



$Y$  : Facteur axial dépendant de  $F_a/c_0$  et  $F_a/F_r$ .

## VI 61 - Calcul des charges axiales et radiales sur les Paliers.

Arbre	Palier	charge axiale [N]	charge radiale [N]
1	A	$F_{x1} = 434,5$	$\sqrt{R_{A1}^2 + R_{A2}^2} = \sqrt{49,45^2 + 119,98^2} = 129,77$
	B	0	$\sqrt{R_{B1}^2 + R_{B2}^2} = \sqrt{49,45^2 + 40,52^2} = 63,93$
2	A	0	$\sqrt{R_{A1}^2 + R_{A2}^2} = \sqrt{217,25^2 + 2574,98^2} = 2584,13$
	B	$F_{x2} = 98,90$	$\sqrt{R_{B1}^2 + R_{B2}^2} = \sqrt{217,25^2 + 305,14^2} = 374,58$

## VI 62 - Calcul des charges dynamiques équivalentes.

Arbre	Palier	$F_a/F_r$	X	Y	$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$ [N]
1	A	3,34	0,56	1	$P = 0,56 \cdot 129,77 + 434,5 = 507,17$
	B	0	1	0	$P = 63,93$
2	A	0	1	0	$P = 2584,13$
	B	0,26	0,56	1,6	$P = 0,56 \cdot 374,58 + 1,6 \cdot 98,9 = 368$

Ces résultats ont été trouvés d'après les valeurs de  $x$  et  $y$

relevés du tableau 40-63 sur A. chevalier, relatives aux roulements à une rangée de billes, choisis pour notre construction.

## VI 63. Calcul des charges dynamiques réelles.

on a choisit le même roulement 20 BC02 pour les deux arbres, dont les caractéristiques sont :

$$C = 9800 \text{ N} ; D = 47 \text{ mm} ; B = 14 \text{ mm}.$$

la charge dynamique réelle pour les roulements à billes est donc :

$$C' = P \left( \frac{60 \cdot n \cdot L_h}{10^6} \right)^{1/3}$$

En estimant une durée de vie  $L_h$  à 10.000 heures, les valeurs seront :

Arbre	Palier	$n$ [tr/min]	$C' = P \cdot (0,6n)^{1/3}$ [N]	$C$ [N]	observation
1	A	1500	4896,67	9800	$C' < C$
	B	1500	617,24	"	"
2	A	50	8029,49	"	"
	B	50	1143,46	"	"

Les roulements choisis conviennent bien à notre construction.

## VII CONCLUSION

Durant notre projet, nous avons étudié le procédé du traitement thermique superficiel de l'acier par courant à haute fréquence. Le but du travail est d'étudier la capacité de l'installation pour changer son régime de travail afin d'augmenter la production.

Nous avons présenté une observation principale du procédé et du mécanisme de la machine de trempe superficielle (mécanisme de rotation des rouleaux, inducteur, mécanisme de déplacement des pièces), dont le dispositif de rotation des rouleaux supports de pièces a été étudié d'une manière plus détaillée.

Pendant l'étude nous avons essayé le traitement thermique des "Axes de ressorts" en acier XC48 en changeant la puissance, la vitesse d'avance des pièces (déplacement à travers l'inducteur).

Nous avons examiné le changement de la dureté et de la structure en fonction du régime de trempe superficielle. Les essais de dureté montrent que l'augmentation de la puissance (de 38,5 kW à 85 kW) et la diminution de la vitesse provoquent l'augmentation de la dureté et de la

profondeur de pénétration de la trempe.

Dans notre étude on a constaté que le régime industriel utilisé à la "SONACOME" ( $P = 67,5 \text{ kW}$ ;  $v = 4 \text{ mm/s}$ ) donne les résultats satisfaisants ( $\text{HRC} \geq 57$ ;  $\delta = 1,5 - 2 \text{ mm}$ ).

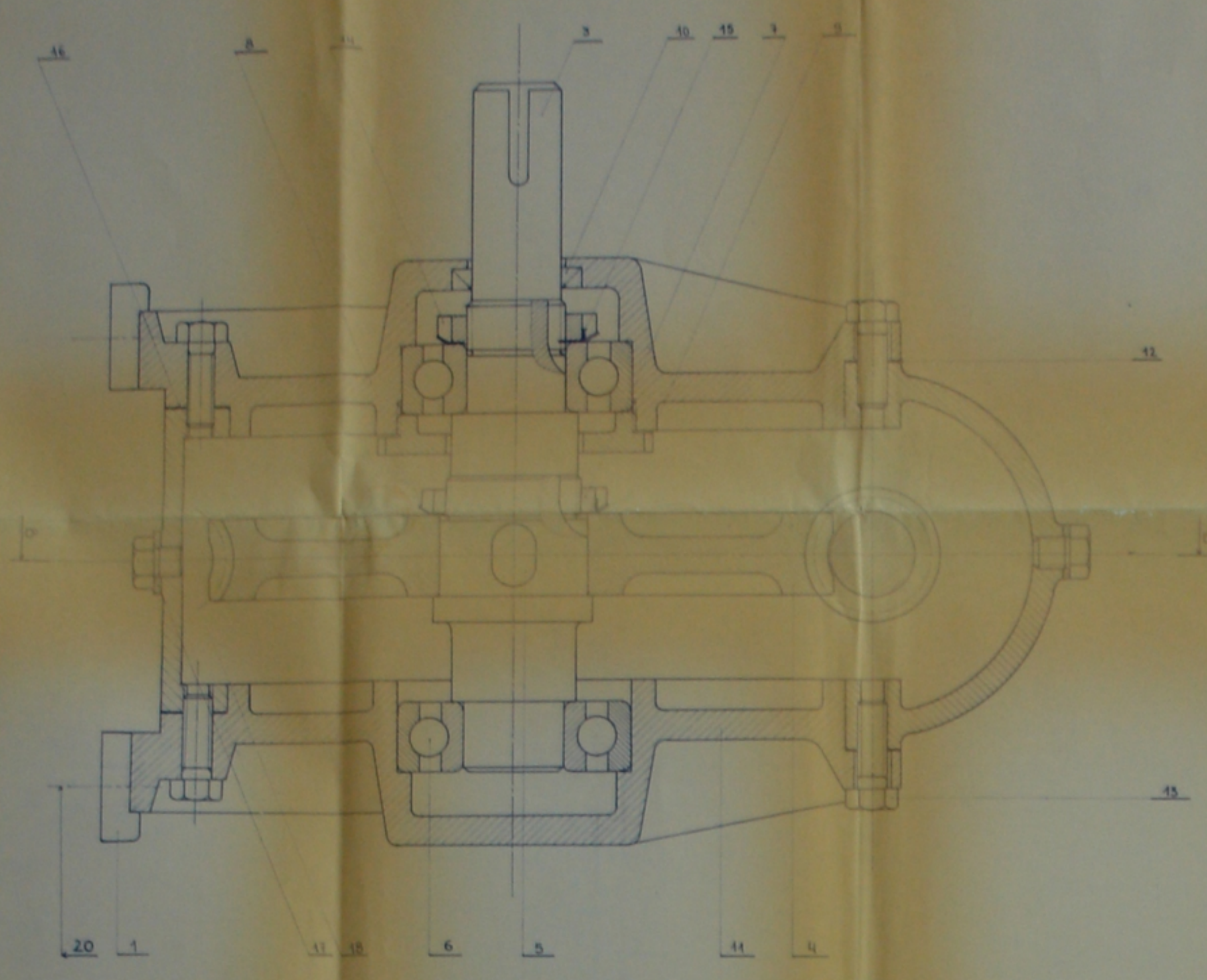
On peut remarquer de plus que l'augmentation de la puissance provoque une certaine augmentation des cristaux martensitiques sans influencer sur la dureté, probablement à cause de la vitesse de chauffage.

Nous avons pu mettre en évidence que l'augmentation de la vitesse exige l'élevation de la puissance pour améliorer le rendement de l'installation.

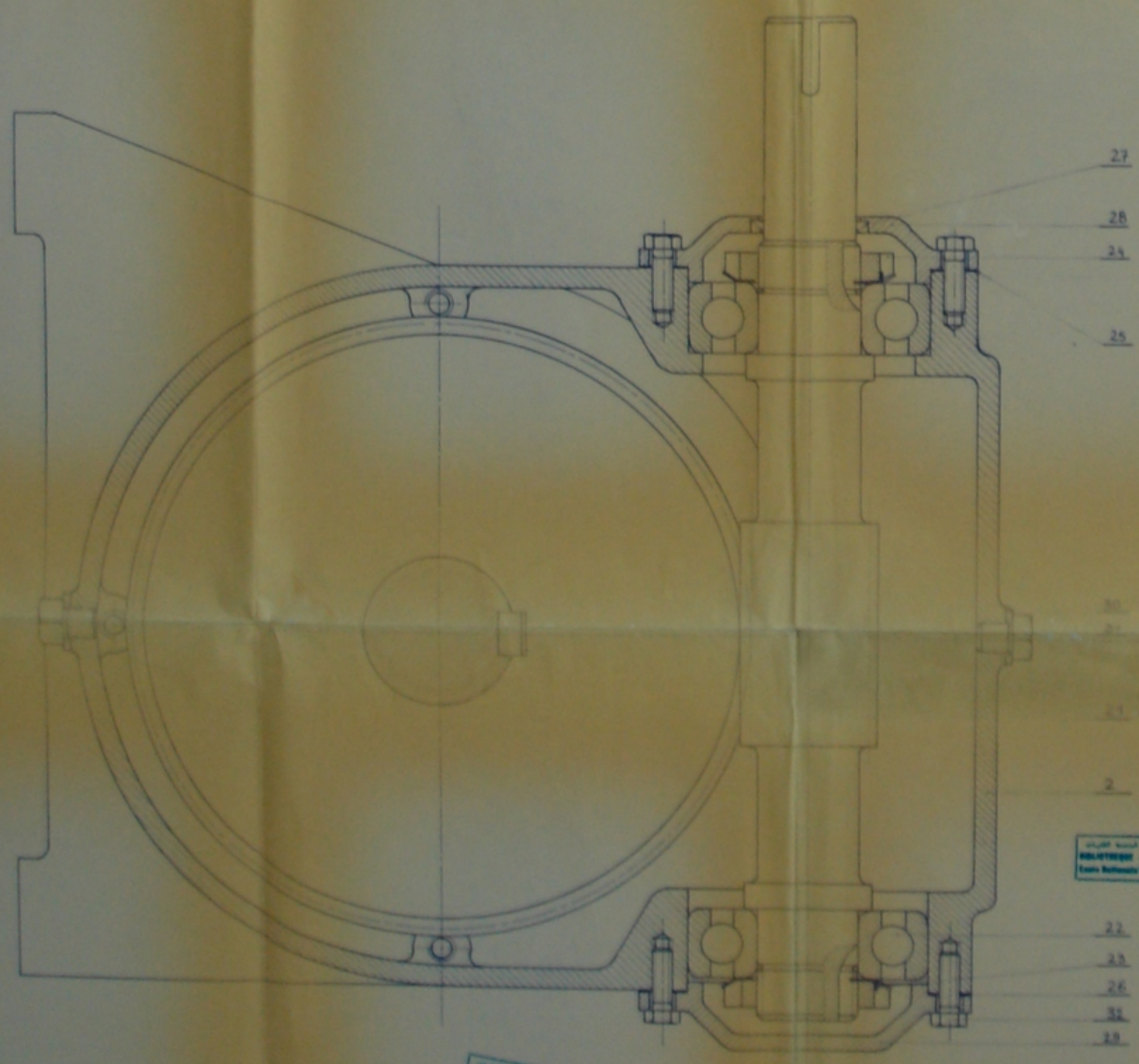
Enfin ce projet de fin d'études nous a été utile pour approfondir nos connaissances technologiques et compléter notre formation d'ingénieurs mécaniciens.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] I. LAKHTINE " Métallographie et traitements thermiques des métaux "
- [2] J. LIGNON et R. MAILLEBUAU " Métaux ferreux "
- [3] ENCYCLOPEDIE " Technique de l'ingénieur "
- [4] REVUES " Traitements thermiques - n° 190 "
- [5] G. de SMET " La pratique des traitements thermiques des métaux industriels "
- [6] A. CHEVALIER " Guide du dessinateur industriel "
- [7] G. HENRIOT " Traité théorique et pratique des engrenages - 6<sup>e</sup> édition "
- [8] IGOR TROÏTSKI " Cours de CM2 "
- [9] V. DOBROVOLSKI " Elements de machines "



COUPE A-A



COUPE B-B

N°	Désignation	Qté	Mat.	Obs
1	Vis M4x16	8	A2-70	
2	Écrou M4x16	8	A2-70	
3	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
4	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
5	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
6	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
7	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
8	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
9	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
10	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
11	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
12	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
13	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
14	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
15	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
16	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
17	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
18	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
19	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
20	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
21	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
22	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
23	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
24	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
25	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
26	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
27	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
28	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
29	Clouet 2x4x16	1	A2-70	
30	Clouet 2x4x16	1	A2-70	